

**EVALUACIÓN DE NIVELES DE CALIDAD DE ENERGÍA, DIAGNÓSTICO Y
ESTUDIO DE MITIGACIÓN DE ARMÓNICOS EN LA SUBESTACIÓN LATERÍA
DE GRACETALES S.A.**

MANUEL ALEJANDRO MARRUGO GUERRERO

GREGORY MIGUEL HERNÁNDEZ LÓPEZ

**TRABAJO DE GRADO COMO REQUISITO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO ELÉCTRICO**

UNIVERSIDAD DE LA COSTA – C.U.C.

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

BARRANQUILLA - COLOMBIA

2012

**EVALUACIÓN DE NIVELES DE CALIDAD DE ENERGÍA, DIAGNÓSTICO Y
ESTUDIO DE MITIGACIÓN DE ARMÓNICOS EN LA SUBESTACIÓN LATERÍA
DE GRACETALES S.A.**

MANUEL ALEJANDRO MARRUGO GUERRERO

GREGORY MIGUEL HERNÁNDEZ LÓPEZ

**TRABAJO DE GRADO COMO REQUISITO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO ELÉCTRICO**

DIRECTOR

ING. CARLOS ARTURO SUÁREZ LANDAZÁBAL

UNIVERSIDAD DE LA COSTA – C.U.C.

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

BARRANQUILLA - COLOMBIA

2012



Nota de aceptación

Firma del Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Barranquilla 05 de Octubre del 2012

DEDICATORIA

A Dios Todopoderoso, le agradecemos el hecho que podamos terminar este trabajo donde culminamos un ciclo como profesionales, el cual nos sirve para enriquecernos intelectualmente y académicamente para servirle y ofrecerle a Él.

A nuestros padres, sin las cuales mediante su apoyo, constancia y sabiduría hubiera sido imposible realizar este trabajo como requisito para optar al título profesional que orgullosamente obtendremos.

A nuestras familias agradece por la colaboración y apoyo constante e incondicional.

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestros agradecimientos a aquellas personas sin las cuales no se hubiera podido realizar este trabajo:

A la Universidad de la Costa CUC como entidad que nos permitió formarnos como profesionales durante toda una carrera.

Al ingeniero José Avendaño, por su colaboración y disposición en GRACETALES S.A., al facilitar la investigación dentro de la empresa.

A Energía Eficiente S.A. E.S.P., por facilitar los medios para la realización de este trabajo.

Al ingeniero Carlos Suárez por su asesoría y tiempo para el mejoramiento de este trabajo de grado.

Al cuerpo docente y directivo del programa de Ingeniería Eléctrica, por brindar los conocimientos requeridos y la colaboración necesaria en la ejecución del trabajo.

A cada una de las personas quienes de forma directa e indirecta colaboraron para que este proyecto fuese desarrollado.

RESUMEN

El presente trabajo de grado tiene por objeto determinar las causas y posibles soluciones correspondientes a las fallas en las tarjetas electrónicas asociadas al variador de velocidad del compresor de aire NIRVANA, instalado en el área de LATERÍA de la organización GRACETALES S.A. por medio de recopilación de información obtenida a través de inspecciones en instalaciones eléctricas, mediciones de parámetros de red eléctrica con equipo analizador de redes y detección de temperaturas anormales de operación de equipos con cámara termográfica.

Una vez recopilada y procesada la información, se procede entonces a la interpretación de datos y diagnóstico de las condiciones de operación descritas por los equipos instalados en el área sometida a estudio. Por último se expone como solución la implementación de un filtro activo el cual además de mitigar los efectos nocivos causados por armónicos en la red eléctrica, optimiza el rendimiento de operación del variador de velocidad del compresor de aire minimizando su consumo de energía.

ABSTRACT

This investigation is based on the identification of the causes and possible solutions and failures in electronic cards that are associated with the NIRVANA air compressor's VSD (Variator Speed Drive). It has been installed in the area of LATERÍA of the GRACETALES S.A. company, The survey was conducted by the collection of information that was obtained through inspections on the electrical installation, measure of network with the grid analyzer instrument with the objective of detecting irregular temperature operation of equipment with thermographic camera.

When all the information was collected and processed it was used for data interpretation and diagnosis of irregular conditions described by the equipment installed in the area under study. Finally was exposed as a solution the implementation of an active filter which in addition to mitigate the harmful effects caused by harmonics on the electrical network, it will optimize the operation of the air compressor's VSD while minimizing energy consumption.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
I.INTRODUCCIÓN	1
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
2. OBJETIVOS	3
2.1.OBJETIVO GENERAL	3
2.2.OBJETIVOS ESPECIFICOS	3
3. JUSTIFICACIÓN	4
4. ESTADO DEL ARTE.....	5
4.1.ANTECEDENTES	5
4.2.PROTOCOLOS DE INSPECCIÓN UTILIZADOS	6
4.3.NORMATIVIDAD TÉCNICA APLICADA PARA EL DESARROLLO DEL DIAGNÓSTICO.....	6
4.4.ANALIZADORES DE REDES	7
5. MARCO TEÓRICO.....	9
5.1.CALIDAD DE LA ENERGÍA	9
5.2.CALIDAD DE LA POTENCIA	10
5.3.PERTURBACIONES DE CALIDAD DE LA POTENCIA.....	10
5.3.1. Transitorios	13
5.3.1.1. Transitorios impulsivos.....	13

5.3.1.2. Transitorios oscilatorios	14
5.3.2. Interrupciones	15
5.3.3. Sags	16
5.3.4. Swells	18
5.3.5. Desbalance de tensión	18
5.3.6. Desplazamiento DC	20
5.3.7. Muestras	21
5.3.8. Ruido	21
5.3.9. Fluctuaciones de tensión – Flicker	22
5.3.10. Variaciones de frecuencia de alimentación	23
5.4. ARMÓNICOS	24
5.4.1. Otros tipos de armónicos	25
5.4.2. Causas de armónicos	26
5.4.3. Efectos de los armónicos	27
5.4.4. Índices de armónicos	29
5.4.4.1. THD (Total Harmonic Distortion)	29
5.4.4.2. TDD (Total Demand Distortion)	31
5.4.5. Evaluación de armónicos en comparación con la normativa	32
5.4.5.1. IEEE 519 – 1992	33
5.4.5.2. EN 50160	35

5.4.5.3. Normatividad Técnica Colombiana.....	36
5.4.6. Soluciones frecuentes a problemas de armónicos.....	37
5.4.6.1. Reactancias de línea o choque	37
5.4.6.2. Filtros de armónicos	38
5.4.6.2.1. Filtros pasivos	38
5.4.6.2.2. Filtros activos	39
5.4.6.2.3. Filtros híbridos	41
5.5. APLICACIONES DE ANÁLISIS DE SISTEMAS DE POTENCIA	41
5.6. ANÁLISIS DE ARMÓNICOS.....	42
5.6.1. Información necesaria para un estudio de calidad de potencia	43
5.7. MEDICIONES DE CALIDAD DE POTENCIA	44
5.7.1. Importancia de medición de armónicos.....	44
5.7.2. Tipos de medida.....	45
5.7.3. Equipos de medición de calidad de potencia.....	46
6. DELIMITACIÓN.....	47
6.1. DELIMITACION ESPACIAL.....	47
6.2. DELIMITACIÓN CRONOLÓGICA	47
6.3. ALCANCES.....	47
6.4. LIMITACIONES.....	47
7. DISEÑO METODOLÓGICO	49

8. MEDICIONES Y RESULTADOS.....	52
8.1.IDENTIFICACIÓN DE FALLAS EN EL SERVICIO DE AIRE COMPRIMIDO EN EL PROCESO PRODUCTIVO.....	52
8.2.SOLICITUD LÍNEA BASE INSPECCIÓN ELÉCTRICA.....	52
8.3.INSPECCIÓN VISUAL INSTALACIÓN ELÉCTRICA <i>LATERÍA</i>.....	52
8.4.MEDICIONES REALIZADAS.....	56
8.4.1. Mediciones Eléctricas.....	56
8.4.2. Mediciones Térmicas.....	58
8.5.RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN MEDICIONES ELÉCTRICAS	65
8.5.1. Mediciones Eléctricas en el variador de velocidad del compresor Nirvana.....	65
8.5.2. Mediciones Eléctricas en el Transformador principal del área de Latería 70	
8.5.3. Mediciones Eléctricas en el totalizador del compresor Nirvana.....	74
8.6.ANÁLISIS DE CONFORMIDAD DE LAS MEDICIONES ELÉCTRICAS REALIZADAS.....	79
8.6.1. Análisis de las mediciones en el variador de velocidad del compresor Nirvana.....	80
8.6.2. Análisis de las mediciones en el transformador principal área de Latería 83	
8.6.3. Análisis de las mediciones en el totalizador del compresor Nirvana....	89

8.7. ESTUDIO DE MITIGACIÓN DE ARMÓNICOS MEDIANTE IMPLEMENTACIÓN DE UN FILTRO ACTIVO.....	91
8.7.1. Situación actual.....	91
8.7.2. Concepto de la mejora.....	91
8.7.3. Situación futura.....	91
8.7.4. Ahorro energético	92
8.7.5. Variables ambientales	96
8.7.6. Ahorro económico	96
8.7.7. Resumen.....	97
9. RECOMENDACIONES	98
10. CONCLUSIONES.....	99
GLOSARIO.....	100
BIBLIOGRAFÍA	103
11. ANEXOS	105
11.1. REGISTROS DE LAS MEDICIONES REALIZADAS	106
11.1.1. Régimen de operación de los compresores durante las mediciones realizadas correspondientes a la fecha del 07 de julio del 2011.....	106
11.1.2. Registro de mediciones de nivel de tensión, desbalance y variación en el transformador del área de <i>Latería</i>	108
11.1.3. Registro de mediciones en el totalizador del compresor Nirvana	110
11.2. HOJAS DE ESPECIFICACIONES (DATASHEETS).....	113

11.2.1. Analizador de Red Circuitor AR5-L.....	113
11.2.2. Cámara Termográfica Fluke Ti10.....	114
11.3. CARTA DE AUTORIZACIÓN PARA LA REALIZACIÓN DEL TRABAJO DE GRADO	115

ÍNDICE DE GRÁFICOS

	Pág.
Gráfica 1. Definición de calidad de energía.	9
Gráfica 2. Transitorio impulsivo de tensión positiva y negativa.	14
Gráfica 3. Transitorio impulsivo de corriente.....	14
Gráfica 4. Transitorio oscilatorio causado por bancos de condensadores....	15
Gráfica 5. Interrupción de nivel de tensión en tiempo y en porcentaje.	16
Gráfica 6. Sags típicos con duración y nivel de tensión.	17
Gráfica 7. Forma de onda un sag debido a una falla a tierra.	17
Gráfica 8. Gráfico de tensión en P.U. de un swell debido a una falla en el SPT	18
Gráfica 9. Ejemplo de medición de desbalance de tensión.	20
Gráfica 10. Forma de onda de desplazamiento DC.....	20
Gráfica 11. Señal de onda con muescas o notching.	21
Gráfica 12. Registro de medición de niveles de ruido en una onda de tensión.	22
Gráfica 13. Registro de medición de nivel de tensión de flicker generado por un horno de arco.....	23
Gráfica 14. Registro de medición de niveles de ruido en una onda de tensión.	24
Gráfica 15. Ejemplo de sumatoria de armónicos para generar una forma de onda.	25
Gráfica 16. Registro de frecuencias interarmónicas en un horno de arco.	26
Gráfica 17. Ejemplo de sistema de impedancia no lineal.	26
Gráfica 18. Efecto piel en los diferentes calibre y diferentes frecuencias.....	28
Gráfica 19. Efecto de pérdidas en los conductores debido a armónicos de rectificación de 6 pulsos.	29

Gráfica 20. Ejemplo variación THD en una semana.....	31
Gráfica 21. Gráfico comparativo de THD _i utilizando reactancia de línea.	38
Gráfica 22. Diferentes arreglos de filtros pasivos.....	39
Gráfica 23. Principio de funcionamiento de filtro activo.	40
Gráfica 24. Principio de funcionamiento de filtro híbrido.	41
Gráfica 25. Flujograma utilizado para clasificar equipos de medida según la norma IEC 61000-3-2.....	46
Gráfica 26. Flujograma de la metodología.....	51
Gráfica 27. Datos de placa Transformador Siemens área de Latería.	53
Gráfica 28. Diagrama unifilar de la subestación <i>Latería</i>	54
Gráfica 29. Comportamiento de presión en la tubería de descarga.	55
Gráfica 30. Diagrama unifilar de las mediciones realizadas.	57
Gráfica 31. Comportamiento del nivel de tensión en el variador de velocidad.	66
Gráfica 32. Comportamiento de la corriente en el variador de velocidad.....	67
Gráfica 33. Comportamiento del factor de potencia en el variador de velocidad.	67
Gráfica 34. Forma de ondas de las corrientes y tensiones en el variador de velocidad.	68
Gráfica 35. Promedios de las magnitudes armónicas en el variador de velocidad.	69
Gráfica 36. Tasa de distorsión armónica presente en el variador de velocidad	70
Gráfica 37. Comportamiento de la tensión en el transformador principal en el área de Latería.....	71
Gráfica 38. Comportamiento de la corriente en el transformador principal área de Latería.....	71
Gráfica 39. Comportamiento del factor de potencia en el transformador principal en el área de Latería.....	72

Gráfica 40. Forma de ondas de corrientes y tensiones en el transformador principal área de Latería.....	73
Gráfica 41. Promedios de magnitudes armónicas en el transformador principal del área de Latería.....	73
Gráfica 42. Tasa de distorsión armónica presente en el transformador principal del área de Latería.....	74
Gráfica 43. Comportamiento de la tensión en el totalizador del compresor Nirvana.....	75
Gráfica 44. Comportamiento de la corriente en el totalizador del compresor Nirvana.....	76
Gráfica 45. Comportamiento del factor de potencia en el totalizador del compresor Nirvana.	76
Gráfica 46. Forma de ondas de las corrientes y tensiones en el totalizador del compresor Nirvana.	77
Gráfica 47. Promedios de magnitudes armónicas en el totalizador del compresor Nirvana.	78
Gráfica 48. Tasa de distorsión armónica presente en el totalizador del compresor Nirvana.	79
Gráfica 49. Resumen gráfico de las mediciones en la subestación de Latería.	80
Gráfica 50. Tendencia de la corriente y el quinto armónicos en el variador de velocidad del compresor Nirvana.....	81
Gráfica 51. Tendencia del THD en corriente en el variador de velocidad del compresor Nirvana.	83
Gráfica 52. Evolución de la tensión por fases en el transformador Latería...84	
Gráfica 53. Comportamiento del desbalance de tensión en el transformador Latería.....	84
Gráfica 54. Tendencia de la corriente y el quinto armónico en el secundario del transformador de Latería.	85

Gráfica 55. Tendencia del THD en corriente en el secundario del transformador de Latería.	88
Gráfica 56. Tendencia del THD en tensión en el secundario del transformador de Latería.	89
Gráfica 57. Tendencia de la corriente y el quinto armónicos en el totalizador del compresor Nirvana.	89
Gráfica 58. Tendencia del THD_i en el totalizador del compresor Nirvana.	90
Gráfica 59. Tendencia del THD_i en P.U. en el totalizador del compresor Nirvana.	92
Gráfica 60. Tendencia de la corriente y la potencia reactiva en el totalizador del compresor Nirvana.	92

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de Perturbaciones de Calidad de Potencia.	12
Tabla 2. Relación de límites de distorsión armónica en sistemas de potencia.	34
Tabla 3. Resumen de estándares IEEE relacionados con armónicos.	35
Tabla 4. Relación expresada en porcentaje de tensión nominal.	36
Tabla 5. Nivel de THD _v mínimo para sistemas de potencia.	37
Tabla 6. Datos de placa Variador de Velocidad Ingersoll Rand.	65
Tabla 7. Promedios de las magnitudes armónicas en el variador de velocidad del compresor Nirvana.	81
Tabla 8. Cumplimiento con la norma de las magnitudes armónicas en el variador de velocidad del compresor Nirvana.	82
Tabla 9. Variación de la tensión y corriente en el transformador principal <i>Latería</i>	83
Tabla 10. Condiciones en las mediciones del transformador principal <i>Latería</i>	86
Tabla 11. Corrientes medidas en el transformador principal <i>Latería</i>	87
Tabla 12. Armónicos presentes en el transformador principal <i>Latería</i>	87
Tabla 13. Promedios de las magnitudes armónicas en corriente en el totalizador del compresor Nirvana.	90
Tabla 14. Valores máximos registrados en el totalizador del compresor Nirvana.	93
Tabla 15. Valores promedio registrados en el totalizador del compresor Nirvana.	94
Tabla 16. Ahorro económico debido a la implementación de un filtro activo de corrección armónica.	96
Tabla 17. Resumen de la propuesta de mejora.	97

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

	Pág.
Ilustración 1. Fotografía analizador de red gama media.	7
Ilustración 2. Fotografía analizador de red gama alta.	8
Ilustración 3. Termografía N°1 tomada en el tablero de conexión.....	58
Ilustración 4. Termografía N° 2 tomada en el tablero de conexión.....	59
Ilustración 5. Termografía tomada en el variador de velocidad del compresor.	60
Ilustración 6. Termografía tomada en la Reactancia de Línea.....	61
Ilustración 7. Termografía tomada en el Alojamiento del Motor.....	62
Ilustración 8. Termografía tomada en la carcasa del compresor.	63
Ilustración 9. Termografía tomada en el motor del ventilador del compresor.	64

ÍNDICE DE ECUACIONES

Pág.

Ecuación 1. Cálculo del Porcentaje del desbalance de tensión.....	19
Ecuación 2. Cálculo del promedio para el desbalance de tensión.....	19
Ecuación 3. Cálculo del D1 para el desbalance de tensión.....	19
Ecuación 4. Cálculo del D2 para el desbalance de tensión.....	19
Ecuación 5. Cálculo del D3 para el desbalance de tensión.....	19
Ecuación 6. Ecuación del THD en Forma general.....	30
Ecuación 7. Ecuación del THD en Corriente.....	31
Ecuación 8. Ecuación del límite del armónico individual.....	82
Ecuación 9. Cálculo para el límite del armónico 5.....	82
Ecuación 10. Cálculo para el límite del armónico 7.....	82
Ecuación 11. Cálculo para el límite del armónico 11.....	82
Ecuación 12. Cálculo para el límite del armónico 13.....	82
Ecuación 13. Ecuación para la corriente armónica.....	93
Ecuación 14. Cálculo para la corriente armónica.....	93
Ecuación 15. Resultado de la corriente armónica.....	93
Ecuación 16. Ecuación para la corriente del filtro activo.....	93
Ecuación 17. Ecuación corriente armónica para compensar los KVA.....	94
Ecuación 18. Cálculo corriente armónica para compensar los KVAR.....	94
Ecuación 19. Resultado corriente armónica para compensar los KVAR.....	94
Ecuación 20. Calculo de la corriente del filtro activo.....	94
Ecuación 21. Resultado de la corriente armónica del filtro activo.....	94
Ecuación 22. Cálculo de la corriente armónica promedio.....	95
Ecuación 23. Resultado de la corriente armónica promedio.....	95
Ecuación 24. Ecuación de la potencia activa dejada de consumir.....	95

Ecuación 25. Cálculo de la potencia activa dejada de consumir.....	95
Ecuación 26. Resultado de la potencia activa dejada de consumir.....	95
Ecuación 27. Ecuación de la energía activa dejada de consumir.....	95
Ecuación 28. Cálculo de la energía activa dejada de consumir.....	95
Ecuación 29. Resultado de la energía activa dejada de consumir.....	95
Ecuación 30. Cálculo del ahorro económico por filtrado de armónicos.....	96

I. INTRODUCCIÓN

La implementación de las normas de calidad de energía en Colombia nacen de la necesidad del sector industrial y comercial de mitigar los perjuicios causados por motivos de presencia de armónicos, además de las exigencias del operador de red. La energía eléctrica es pieza fundamental para las óptimas operaciones de una organización, razón por la que debe ser bien administrada.

El uso eficiente de la energía no solo conlleva a significativos beneficios para una organización, también repercute positivamente en mejoras del rendimiento energético a través de la reducción de los costos operacionales, así como la disminución del consumo de energía asociada a los procesos. La energía representa un factor trascendental independientemente de la actividad que se desarrolle.

Un estudio de calidad de la energía es necesario en una empresa para exhibirle de costos de penalizaciones por parte del operador de red (en caso de incumplir con sus lineamientos) y mejorar la calidad de la instalación eléctrica, optimizando el proceso, generando mejores estándares y reduciendo al mínimo las pérdidas por calidad de potencia.

En este trabajo se realizará una evaluación general del sistema eléctrico de la subestación del área de latería en la empresa GRACETALES S.A. para determinar los niveles de armónicos que puedan estar afectando la normal operación de equipos y de este modo evitar daños a los mismos, teniendo en cuenta los parámetros límites establecidos de conformidad con la norma IEEE 519 – 1992.

En el presente trabajo de grado, la sección 1 describe los equipos y las condiciones que dan lugar a la evaluación de niveles de calidad de energía en la subestación sometida a estudio. La sección 2 establece los objetivos hacia los cuales está direccionada la investigación. La sección 7 plantea los alcances y limitaciones pertinentes a la elaboración. La sección 9 lo concerniente al tratamiento de información recopilada a través de mediciones y resultados y por último en las secciones 10 y 11 las conclusiones y recomendaciones pertinentes.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la empresa GRACETALES S.A. se encuentran instaladas ocho subestaciones dispuestas para las diferentes áreas de producción, el desarrollo de ésta investigación se referirá en particular a la subestación y equipos asociados al área de *Latería* en la cual se encuentra instalada un transformador trifásico 300 KVA de potencia, con una relación de tensión de 13.2kV referido para el lado de alta tensión y 440 V para el lado de baja tensión, el cual está dispuesto para el suministro de energía eléctrica de dos compresores de aire denominados: compresor NIRVANA (de accionamiento por variador de velocidad) y compresor EP-100 (de accionamiento directo), además de una línea de producción destinada para envasado del producto final.

Estos compresores son primordiales para el proceso productivo de la empresa por ser la única fuente de aire comprimido a lo largo de toda la instalación, sus variadores de velocidad son utilizados para modular el nivel de aire comprimido y distribuirlo a manera de pulsos según los requerimientos de los procesos a nivel general, de allí la relevancia de garantizar no solo la confiabilidad de operación de estos equipos sino el suministro de energía eléctrica.

El presente estudio se basa en la necesidad de identificar las posibles causas y medidas de control relacionadas a las fallas de operación de tarjetas electrónicas asociadas al variador de velocidad del compresor NIRVANA, pues una vez ocurridas las fallas la solución fue el reemplazo de las tarjetas electrónicas (sin determinar la causa de dicha eventualidad), además del sobrecalentamiento en los conductores de las instalaciones eléctricas, lo que evidencia que el suministro de energía eléctrica y en particular los niveles de calidad de energía no son los adecuados.

De acuerdo a lo anterior, es necesario formular preguntas que contribuyan a encontrar las respuestas que darán la solución para eliminar el problema, por ejemplo:

¿Los problemas de calidad de potencia en el área de latería son los causantes de las fallas en tarjetas electrónicas, y sobrecalentamiento de los conductores?

¿Qué se necesitaría para el mejoramiento de la calidad de la energía de la instalación eléctrica del área de latería de GRACETALES S.A.?

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

- Realizar una medición de conformidad de niveles de calidad de potencia en las instalaciones del área de latería de la empresa GRACETALES S.A.

2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Detectar las posibles perturbaciones de calidad de potencia que pudieran presentarse en el sistema eléctrico del área de latería de GRACETALES S.A.
- Determinar la naturaleza de las fallas de operación ocurridas en las tarjetas electrónicas de variación de velocidad de los compresores de GRACETALES S.A.
- Determinar las posibles soluciones para mitigar el efecto de los armónicos en caso de identificarse en el sistema eléctrico del área de latería de GRACETALES S.A.

3. JUSTIFICACIÓN

El propósito general de las mediciones realizadas en el sistema de aire comprimido y la determinación de los niveles de calidad de energía presentes en la subestación eléctrica del área de Latería en la empresa GRACETALES S.A., es el planteamiento de las soluciones para minimizar las perturbaciones que allí se encuentren, y que a su vez, representan un ahorro energético y una mejora en la competitividad de la organización a través del aseguramiento de la confiabilidad, brindando la capacidad de entregar un producto final en óptimas condiciones.

Adicionalmente se establece un precedente en materia de calidad de la potencia de las instalaciones eléctricas de la organización, al contar con parámetros de referencia para eventual monitoreo y/o seguimientos referentes a las soluciones implementadas. A nivel académico, esto implica futuras investigaciones y relaciones entre la Universidad de la Costa CUC y la entidad, como participante del sector productivo.

Cabe resaltar la realización de una serie de inspecciones y sugerencias incluidas en la sección 10 del presente documento, las cuales están relacionadas con el sistema eléctrico del área de Latería y de ser tenidas en cuenta para aplicar las medidas de control allí mencionadas serían significativas para este sistema eléctrico.

4. ESTADO DEL ARTE

4.1. ANTECEDENTES

Entre los antecedentes contemplados, los cuales dan lugar a la realización del presente trabajo de grado, cabe mencionar las intervenciones realizadas por parte del personal de mantenimiento de la organización GRACETALES S.A. a través de las cuales se logró la identificación de la falla de operación en las tarjetas electrónicas asociadas a los variadores de velocidad de los sistemas de aire comprimido.

Dichas fallas dieron lugar a la determinación de hacer uso de la garantía de los sistemas de compresión en cuestión, la cual se hizo efectiva mediante una visita realizada por parte de ingenieros especializados en calidad de representantes de la marca Ingersoll-Rand quienes procedieron al reemplazo de las tarjetas electrónicas averiadas.

Posterior al consecutivo reemplazo de las tarjetas electrónicas, y bajo recomendación por parte del fabricante, se determina la realización de un estudio y diagnóstico de calidad de potencia a nivel de equipos y subestación, siendo éste motivo del desarrollo del presente proyecto en el área de Latería.

De acuerdo a las recomendaciones suministradas por el fabricante de las tarjetas electrónicas de variación de velocidad de los compresores Ingersoll Rand, ubicados en la subestación *Latería*, se procede a realizar un diagnóstico de niveles de calidad de potencia de acuerdo a la normativa basado en mediciones tomadas en equipos asociados al área, como referencia para evaluar los puntos donde serán referenciadas las mediciones, se basó en criterios establecidos por el personal de mantenimiento, tales como inspecciones visuales, y mediciones anteriores; al igual que la información suministrada por el personal especializado de Ingersoll Rand.

4.2. PROTOCOLOS DE INSPECCIÓN UTILIZADOS

Se utilizaron varios protocolos de inspección referenciados para este trabajo, entre los cuales se encuentran la normatividad técnica mencionada a continuación, así como los protocolos de inspección y seguridad requeridos por la empresa GRACETALES S.A.

4.3. NORMATIVIDAD TÉCNICA APLICADA PARA EL DESARROLLO DEL DIAGNÓSTICO

Para efectos y desarrollo del diagrama unifilar se aplican las siguientes reglas y normativas:

- IEEE 519-1992 (IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems)
- Normativa Europea EN 50160 (Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución)
- Resolución CREG N° 024 del 2005
- Norma Técnica Colombiana NTC 5000 (Calidad de la Potencia Eléctrica -CPE-. Definiciones y términos fundamentales.)

4.4. ANALIZADORES DE REDES

El analizador de red como herramienta es muy útil a la hora de realizar un estudio de calidad de potencia, en este caso un estudio de armónicos, puesto que permite obtener datos específicos de magnitudes de corrientes y tensiones, para de este modo detectar posibles distorsiones y variaciones en las señales.

Entre los diferentes modelos de analizadores de redes, hay unos que permiten guardar y registrar las formas de onda, e incluso permiten análisis más complejos como cálculos de energía, y análisis de espectros. También permiten guardar registros que pueden ser exportados a software que permiten un análisis de datos muy detallados. A nivel de armónicos los analizadores de red más avanzados permiten un estudio de conformidad de la normativa casi que inmediatos, comparando los datos obtenidos en terreno con los estándares preestablecidos de la norma guardada en la memoria de los analizadores. En las ilustraciones 6.1 y 6.2 se muestran dos analizadores de red de gamas distintas donde se pueden ver las diferencias en el tipo de mediciones que realizan.

Ilustración 1. Fotografía analizador de red gama media.



Ilustración 2. Fotografía analizador de red gama alta.

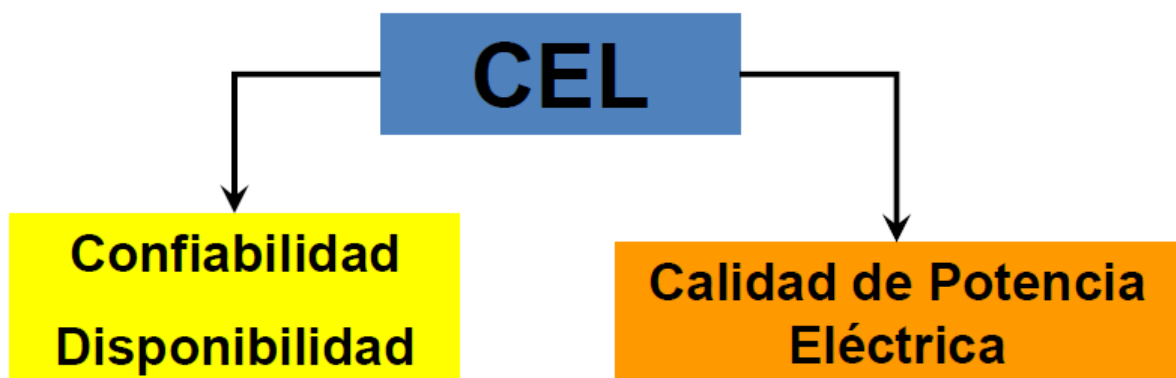


5. MARCO TEÓRICO

5.1. CALIDAD DE LA ENERGÍA

La calidad de energía se divide en dos conceptos como se presenta en el gráfico 1. [1,2]

Gráfica 1. Definición de calidad de energía.



Andrés Pavas. Calidad del Suministro de la Energía Eléctrica. Codensa. (Noviembre 2011) p. 6.

Se define entonces Calidad de la energía como: “*Características físicas de la energía suministrada en condiciones normales de operación, que no producen interrupciones ni operaciones erráticas en equipos y procesos de la carga del suscriptor o en la red de distribución, en cumplimiento de los parámetros establecidos en la norma de servicio eléctrico.*” [2]

Se divide en dos campos: La Calidad de la Potencia, la cual se dedica a estudiar cualquier problema de potencia manifestado en la desviación de la tensión, corriente, frecuencia, de sus valores ideales que ocasionen falla e interrupción de los sistemas eléctricos o mala operación del equipo de un usuario. Por otra parte La Confiabilidad, que se refiere a la probabilidad de que el sistema y equipos eléctricos, puedan funcionar correctamente durante un tiempo determinado. [1,2]

5.2. CALIDAD DE LA POTENCIA

Al realizarse un estudio de calidad de la potencia, es necesario mencionar conceptos que permitan identificar los parámetros que comprende esta rama de la ingeniería eléctrica. Sin embargo antes de adentrarse en un estudio que involucra parámetros, mediciones, y resultados, es necesario conocer en detalle el concepto de calidad de la energía. Es necesario primero mencionar que Calidad de la Potencia como concepto es muy ambiguo, para un usuario puede basarse en la confiabilidad del orden del 99.98% en un sistema de alimentación, mientras que para un fabricante de equipos, son aquellas características del sistema de alimentación que permiten la correcta operación del equipo. [3]

Una definición que define los alcances de la calidad de potencia en un sistema eléctrico dice: *“La calidad de la potencia se ocupa de la compatibilidad que debe existir entre los equipos y la red eléctrica con base en una serie de parámetros y eventos de la red que pueden afectar el funcionamiento o la integridad de los equipos que se le conectan.”* [4]

En la Resolución CREG N° 024 del 2005 se define Calidad de la Potencia Eléctrica (CPE) como: *“Conjunto de calificadores inherentes a la forma de onda de la tensión, que permiten juzgar el valor de las variaciones de tensión instantánea desviaciones pueden tener en equipos eléctricos y otros sistemas.”* [5]

En la norma europea EN 50160 la calidad de potencia es asociada con problemas de alimentación a nivel de magnitud y frecuencia a nivel de tensión que produzcan daños en equipos del cliente, o en el mismo sistema de potencia. [6,7]

5.3. PERTURBACIONES DE CALIDAD DE LA POTENCIA

Existen diferentes perturbaciones de calidad de la potencia, que modifican la forma de onda de la señal de alimentación en diferentes parámetros sea en estado estable (Constantes durante cualquier medición) o en estado transitorio (Ocurren como producto de algún fenómeno). Entre los eventos clasificados como eventos en estado estable cabe mencionar:

- Armónicos
- Interarmónicos

- Subarmónicos
- Desbalances
- Sags
- Swells
- Interrupciones
- Bajos factores de potencia
- Flicker
- Desplazamiento de DC

Las características de la señal de alimentación que se modifican en eventos en estado estable son:

- Amplitud
- Frecuencia
- Modulación
- Impedancia del sistema
- Ancho de muesca

De la misma manera las perturbaciones presentadas en estado transitorio son:

- Transitorios impulsivos
- Transitorios oscilatorios

Las características de la señal de alimentación que se modifican en eventos en estado transitorio son:

- Tasa de crecimiento y decrecimiento
- Amplitud
- Duración
- Frecuencia
- Tasa de ocurrencia
- Energía potencial
- Impedancia del sistema

Del mismo modo estas perturbaciones pueden ser clasificadas debido a sus variaciones en frecuencia, magnitud y duración. Según las normas IEEE 1159 y

NTC 5000, estas perturbaciones pueden clasificarse de la siguiente manera, tal como se presenta en la tabla 6.1. [3,8]:

Tabla 1. Clasificación de Perturbaciones de Calidad de Potencia.

Categorías			Contenido espectral de frecuencia	Duración	Magnitud de voltaje	
Transientes	Impulsivos	Nanosegundos	Incremento de 5-ns	<50 ns	-	
		Microsegundos	Incremento de 10-μs	50 ns - 1ms		
		Milisegundos	Incremento de 0.1 ms	>1 ms		
	Oscilatorio	Baja frecuencia	<5 kHz	0.3-50 ms	0-4 p.u.	
		Media frecuencia	5 - 500 kHz	20 μs	0-8 p.u.	
		Alta frecuencia	0.5 - 5 MHz	5 μs	0-4 p.u.	
Variaciones de corta duración	Instantáneas	Interrupciones	-	0.5 - 30 ciclos	<0.1 p.u.	
		Sags		0.5 - 30 ciclos	0.1 p.u - 0.9 p.u.	
		Swells		0.5 - 30 ciclos	1.1 p.u. - 1.8 p.u.	
	Momentáneas	Interrupciones		30 ciclos - 3 seg.	<0.1 p.u.	
		Sags		30 ciclos - 3 seg.	0.1 p.u - 0.9 p.u.	
		Swells		30 ciclos - 3 seg.	1.1 p.u. - 1.4 p.u.	
	Temporales	Interrupciones		3 Seg. - 1 Min.	<0.1 p.u.	
		Sags		3 Seg. - 1 Min.	0.1 p.u - 0.9 p.u.	
		Swells		3 Seg. - 1 Min.	1.1 p.u. - 1.2 p.u.	
	Variaciones de larga duración	Interrupciones sostenidas		>1 Min.	0.0 p.u.	
		Subtensiones		>1 Min.	0.1 p.u - 0.9 p.u.	
		Sobretensiones		>1 Min.	1.1 p.u. - 1.2 p.u.	
Desbalance de voltaje				Estado estable	0.5 - 2%	
Distorsión de forma de onda	Desplazamiento DC			Estado estable	0 - 0.1%	
	Armónicos		Armónico de orden 0 - 100	Estado estable	0 - 20%	
	Interarmónicos		0 - 6 kHz	Estado estable	0 - 2%	
	Muecas		-	Estado estable	-	
	Ruido		Ancho de banda	Estado estable	0 - 1%	
Fluctuaciones de voltaje			<25 Hz	Intermitentes	0.1 - 7%	
Variaciones de frecuencia de alimentación			-	<10 Seg.	0.2 - 2 Pst	

ROGER, C.D., MCGRANAGHAN M.F., WAYNE H. "Electrical Power Systems Quality" 1996, 265 Pages

En los siguientes capítulos se explicarán de manera simple y concisa las diferentes perturbaciones de Calidad de Potencia, con excepción de los armónicos que serán evaluados aparte en el capítulo 6.4, puesto que son el principal objeto del estudio a realizarse.

5.3.1. Transitorios

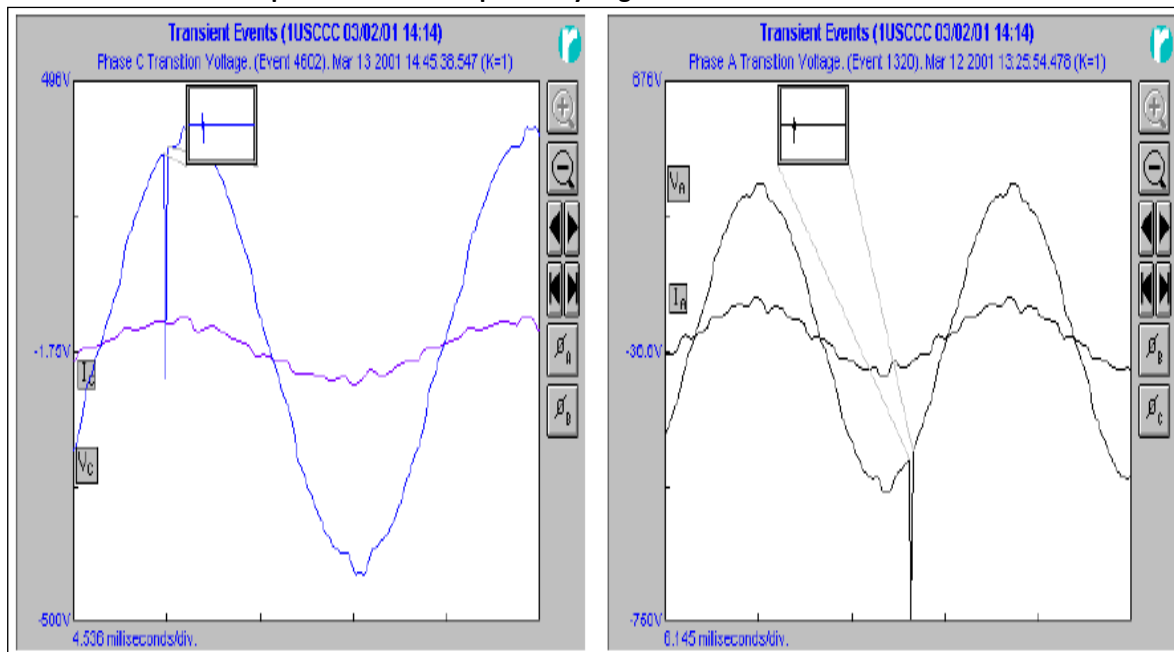
El término transitorio o transiente, se utiliza generalmente en análisis de sistemas de potencia, para referirse a un cambio brusco de una variable eléctrica de un estado estable a un estado no deseado; esto según lo expresado en la norma IEEE 61000-2-1. Generalmente un transitorio, es un cambio brusco de tensión en la forma de onda, que duran desde medio ciclo (μ Seg) hasta varios milisegundos. Se pueden considerar dos tipos de transitorio, tipo impulso o tipo oscilatorio. Si en una forma de onda con transitorio se remueve la forma de onda fundamental y queda un evento superior al 77% de la tensión pico-pico de la componente pura, y de una sola polaridad se considera un transitorio impulsivo. [1, 2,3]

5.3.1.1. Transitorios impulsivos

Un transitorio impulsivo es un cambio de una condición estable como tensión, corriente, o ambos en una sola polaridad a una frecuencia distinta a la fundamental ($f=60$ Hz). Los transitorios impulsivos se caracterizan por sus tiempos de incremento y caída en cuanto a contenido espectral se refiere, esto es importante puesto que afecta seriamente equipos electrónicos, y debido a que involucra altas frecuencias, la forma de estos transitorios varía dependiendo desde donde sea evaluado en el sistema de potencia. Por lo general estos armónicos solamente se observan cerca a la fuente, e incluso algunas veces excitan la frecuencia de resonancia de algunos equipos y producen transitorios oscilatorios. [2,3]

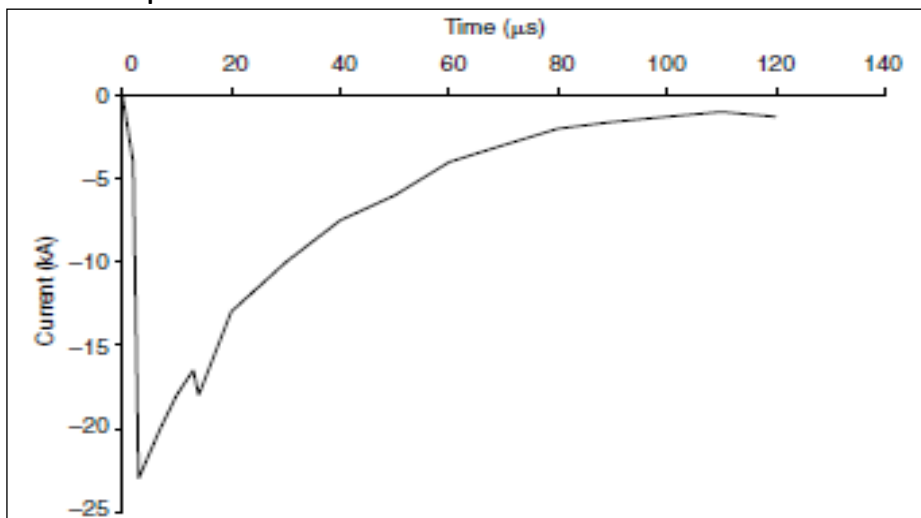
En los gráficos 2 y 3 se presentan gráficos de variación de tensión y corriente en eventos transitorios impulsivos.

Gráfica 2. Transitorio impulsivo de tensión positiva y negativa.



Augusto Abreu. Calidad de potencia eléctrica en redes de distribución. Normas Técnicas. (Junio 2005) p. 23.

Gráfica 3. Transitorio impulsivo de corriente



Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, Surya Santoso, H Wayne Beaty, Electrical Power Systems Quality second edition, New York, McGraw-Hill, 2004 519 p.

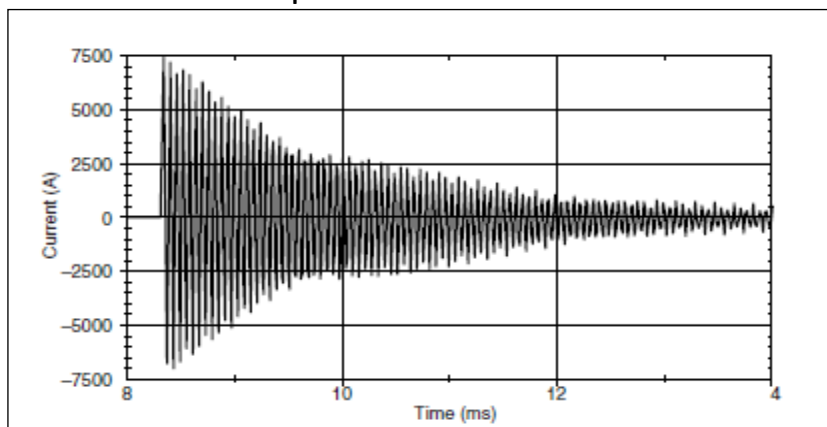
5.3.1.2. Transitorios oscilatorios

Un transitorio oscilatorio tiene las mismas características que un transitorio impulsivo, tal como cambio de condición estable, en variables eléctrica, pero se

diferencia en el hecho que este tiene una polaridad variable (positiva y negativa) y una frecuencia independiente, ocurren generalmente a bajas, media y alta frecuencia de acuerdo al contenido espectral del transitorio (estas frecuencias van de 0,5 a 50 MHz). Se deben generalmente a maniobras de interrupción o energización de bancos de condensadores. [2,3]

En el gráfico 4 se expone un ejemplo de un transitorio oscilatorio a nivel de corriente debido al ingreso conmutado de un banco de condensadores.

Gráfica 4. Transitorio oscilatorio causado por bancos de condensadores.



Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, Surya Santoso, H Wayne Beaty, Electrical Power Systems Quality second edition, New York, McGraw-Hill, 2004 519 p

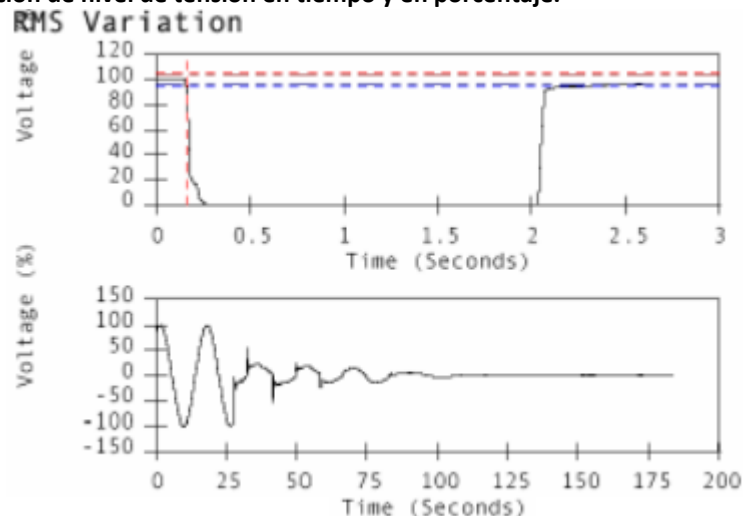
5.3.2. Interrupciones

Una interrupción ocurre cuando la fuente de alimentación o la corriente de carga disminuyen en menos de 0.1 P.U. en una o más fases en un período menor a un minuto. Pueden ser resultado de fallas en el sistema de potencia, fallas en los equipos o fallas en el sistema de control. Estas interrupciones puesto que son de magnitud preestablecida se clasifican de acuerdo a su duración; pueden ser momentáneas ($8 \text{ mseg} < t < 3\text{seg}$), temporales ($3\text{seg} < t < 60\text{seg}$) o sostenidas ($t > 60\text{seg}$).

Una de las principales causas de las interrupciones es a nivel industrial, donde un proceso puede requerir horas para el arranque, sin contar los equipos electrónicos que se des configuran mediante la interrupción. [2,3]

En el gráfico 5 se presenta un ejemplo de una interrupción en un sistema de potencia a nivel de tensión y a nivel porcentual.

Gráfica 5. Interrupción de nivel de tensión en tiempo y en porcentaje.

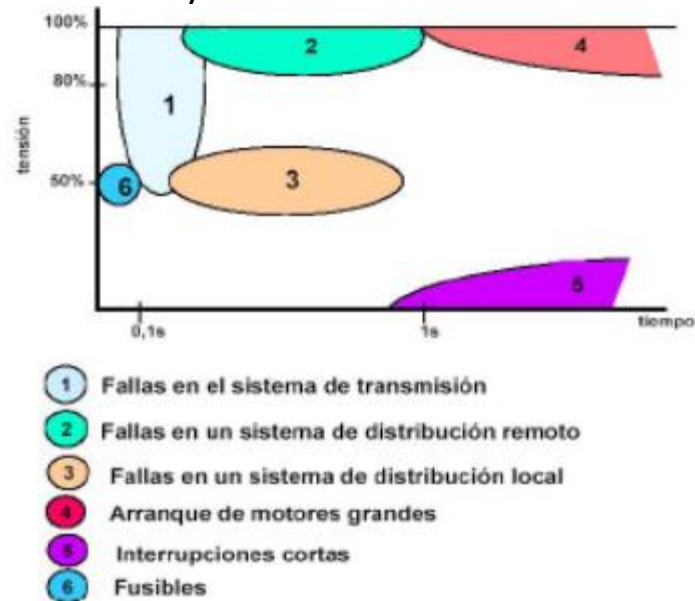


Augusto Abreu. Calidad de potencia eléctrica en redes de distribución. Normas Técnicas. (Junio 2005) p. 25.

5.3.3. Sags

Se conoce como sag a la baja de tensión entre 0.1 y 0.9 P.U. del nivel de tensión o corriente a frecuencia de operación, que dura entre medio ciclo y un minuto. Se producen por fallas en el sistema, energización de cargas muy elevadas que demandan altas corrientes de arranque, o pérdidas intermitentes en el sistema de distribución. Son unos de los problemas menos deseados a nivel de industria puesto que llevan a parada los procesos productivos, teniendo que hacer paradas constantes y arranques donde se pueden demorar tiempo considerable. En el gráfico 6 se expone un gráfico de sags típicos en función de la falla. [2,3]

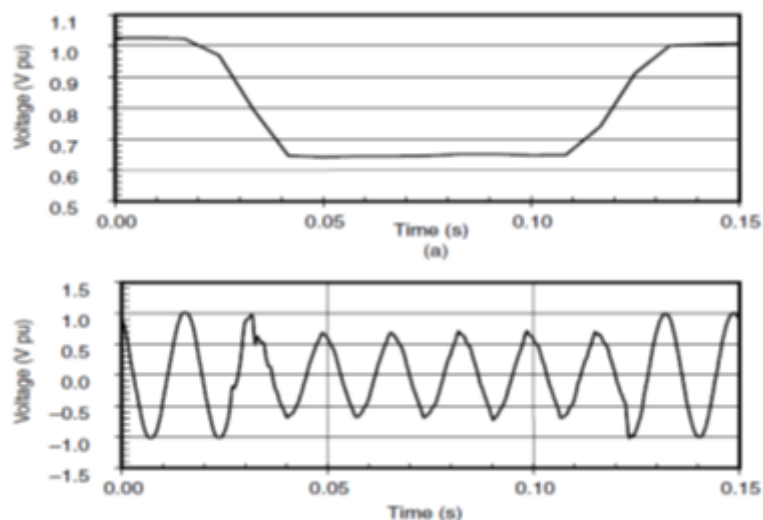
Gráfica 6. Sags típicos con duración y nivel de tensión.



Augusto Abreu. Calidad de potencia eléctrica en redes de distribución. Normas Técnicas. (Junio 2005) p. 27.

En el gráfico 7 se presenta el nivel de tensión de un sistema de potencia durante un sag causado por la falla de un conductor a tierra.

Gráfica 7. Forma de onda un sag debido a una falla a tierra.



Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, Surya Santoso, H Wayne Beaty, Electrical Power Systems Quality second edition, New York, McGraw-Hill, 2004 519 p

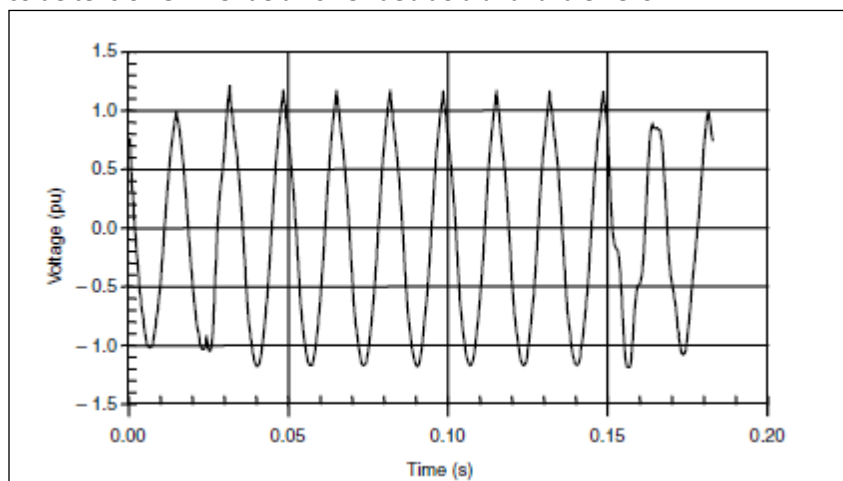
Un método de evaluación de sags se encuentra en la norma IEEE 1346 (*Recommended Practice for Evaluating Electric Power System Compatibility with Electronic Process*) y en los anexos B y C de la norma NTC 5000, se expone la metodología de las cartas de hundimientos (sags). [8]

5.3.4. Swells

Se conoce como swell a la perturbación que incrementa el nivel de tensión o la corriente desde 1.1 a 1.8 P.U. que duran desde medio ciclo a 1 min. Como los sags, los swells son asociados a fallas en el sistema, como fallas monofásicas, y energización de bancos de condensadores y transformadores; aunque los swells son menos comunes que los sags. También tienen efectos más destructivos que los sags, como daños en el sistema de distribución.

En el gráfico 8 se presenta un ejemplo de swells generados por una falla en el sistema de puesta a tierra.

Gráfica 8. Gráfico de tensión en P.U. de un swell debido a una falla en el SPT



Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, Surya Santoso, H Wayne Beaty, *Electrical Power Systems Quality* second edition, New York, McGraw-Hill, 2004 519 p

5.3.5. Desbalance de tensión

El desbalance de tensión, se define como la máxima desviación del promedio de cada uno de los valores de tensión trifásica; esta desviación se expresa en porcentaje según lo referido en las normas que se mencionan a continuación. [3]

- IEC 61000-2-1(1990-05), "Description of the Environment—Electromagnetic Environment for Low Frequency Conducted Disturbances and Signaling in Public Power Supply Systems," *Electromagnetic Compatibility (EMC)—Part 2, Environment, Section 1*, 1990.
- IEEE Standard 100-1992, *IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronic Terms*
- IEC 61000-4-30 77A/356/CDV, *Power Quality Measurement Methods*, 2001.
- IEC 61000-4-15, *Flicker Meter—Functional and Design Specifications*, 1997.

La relación del desbalance de tensión puede ser tomada comparando la secuencia negativa con la secuencia homopolar (secuencia cero) o la secuencia positiva con la secuencia homopolar; aunque la norma IEC 61000-4-30, menciona que debe ser medida esta relación desde la comparación de secuencia negativa. A continuación se exponen las fórmulas del (1) al (5) que se utilizan para el cálculo del desbalance de tensión:

$$\text{Porcentaje de desvalance} = \frac{\text{Máx.}(D_1, D_2, D_3)}{\text{Promedio}} \times 100 \quad \text{Ecuación 1}$$

$$\text{Promedio} = \frac{(V_1 + V_2 + V_3)}{3} \times 100 \quad \text{Ecuación 2}$$

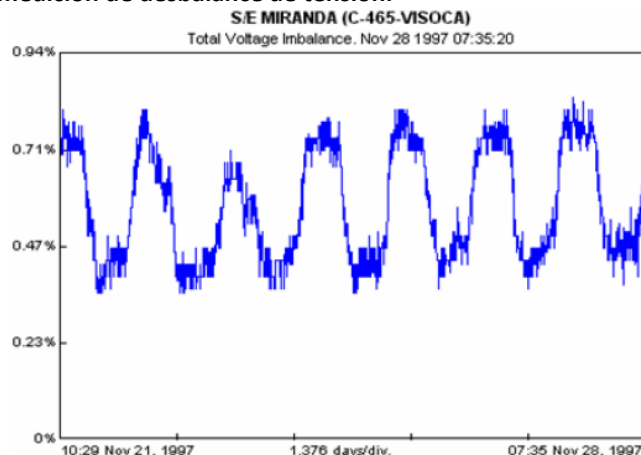
$$D_1 = \text{Abs}(\text{Promedio} - V_1) \quad \text{Ecuación 3}$$

$$D_2 = \text{Abs}(\text{Promedio} - V_2) \quad \text{Ecuación 4}$$

$$D_3 = \text{Abs}(\text{Promedio} - V_3) \quad \text{Ecuación 5}$$

El máximo valor permitido de desbalance expresado en porcentaje según lo establecido por la normativa es del 2%. La principal causa de desbalances por debajo de este valor establecido de 2% son cargas monofásicas en un sistema de potencia trifásico. También se puede presentar debido a fusibles quemados en una de las fases de un banco de condensadores trifásico. Graves fallas de desbalance, superiores del 5%, pueden resultar debido a condiciones monofásicas. En el gráfico 9 se presenta un ejemplo de una medición de desbalance de tensión en una subestación. [2,3]

Gráfica 9. Ejemplo de medición de desbalance de tensión.



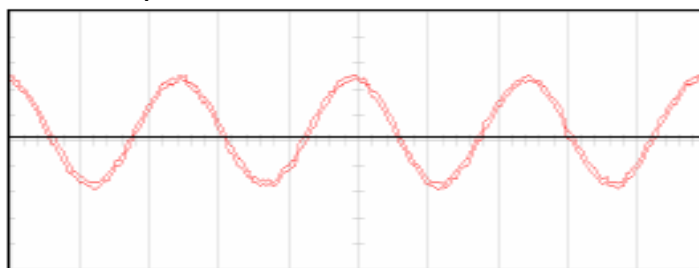
Augusto Abreu. Calidad de potencia eléctrica en redes de distribución. Normas Técnicas. (Junio 2005) p. 23.

5.3.6. Desplazamiento DC

La presencia de un tensión o corriente DC en un sistema de corriente alterna se conoce como desplazamiento DC. Esto puede ocurrir como el resultado de una perturbación geomagnética o asimetría en sistemas que utilicen rectificación electrónica. Este desplazamiento DC produce un recalentamiento en el transformador e incluso fallas en el sistema de puesta a tierra. [2,3]

En el gráfico 10 se ilustra un ejemplo de desplazamiento DC en una forma de onda.

Gráfica 10. Forma de onda de desplazamiento DC.



Augusto Abreu. Calidad de potencia eléctrica en redes de distribución. Normas Técnicas. (Junio 2005) p. 23.

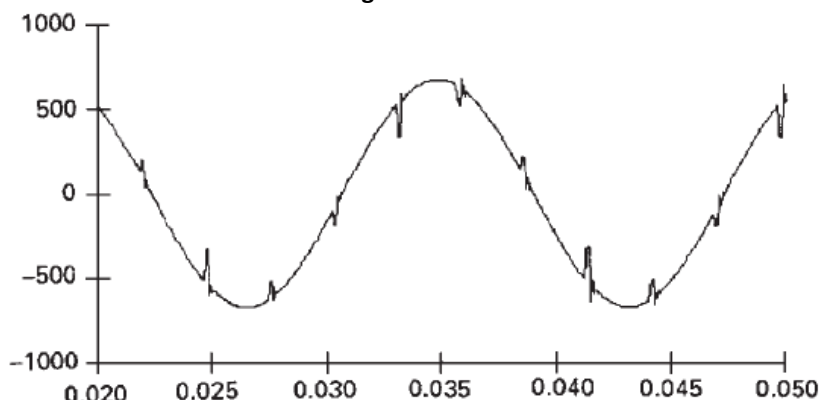
5.3.7. Muestras

Las muescas o notching como se le conoce es una perturbación periódica que ocurre durante la conmutación de dispositivos electrónicos de disparo cuando cambian de una fase a otra. Estas muescas se definen mediante su profundidad (ΔV) y su ángulo en grados eléctricos (μ). [2,3]

Estas muescas ocurren como se mencionó anteriormente en sistemas electrónicos de disparo por ejemplo convertidores como rectificadores, inversores, y variadores de frecuencia, también hace que estos equipos electrónicos operen erráticamente porque estas muescas también pueden generar un cruce por cero, del mismo modo que puede generar armónicos indeseados de alta frecuencia. [2]

En el gráfico 11 se expone en detalle una muesca en una forma de onda y sus características de evaluación.

Gráfica 11. Señal de onda con muescas o notching.



Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, Surya Santoso, H Wayne Beaty, Electrical Power Systems Quality second edition, New York, McGraw-Hill, 2004 519 p.

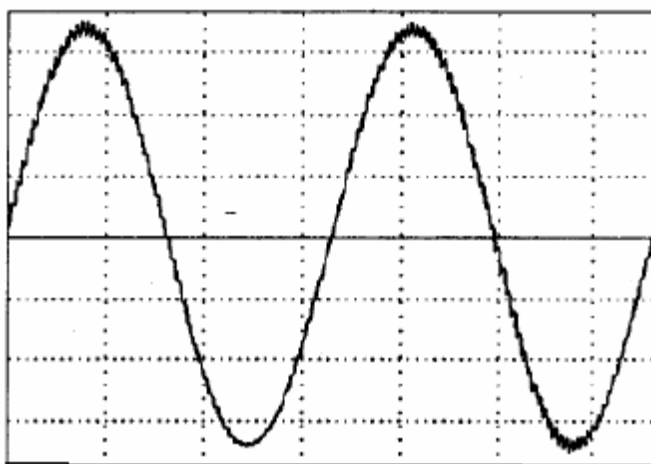
5.3.8. Ruido

Se define *Ruido* como señales eléctricas no deseadas en un ancho de banda espectral inferior a los 200 kHz impuestas en los niveles de tensión y corriente del sistema de potencia, o en otras líneas de transmisión. Puede causarse por dispositivos electrónicos, sistemas de control, equipos de arco eléctrico, cargas con rectificadores, y fuentes conmutables. Estas fallas pueden empeorar en caso de haber un pésimo sistema de puesta a tierra, perturbando la operación de

equipos electrónicos como PLC's y sistemas de computación; este problema puede ser mitigado usando filtros, transformadores de aislamiento, entre otras soluciones. Una magnitud aceptable por normativa de ruido por lo general es inferior al 1%.

En el gráfico 12 se presenta un ejemplo de un registro de niveles de ruido en una forma de onda. [2,3]

Gráfica 12. Registro de medición de niveles de ruido en una onda de tensión.



Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, Surya Santoso, H Wayne Beaty, Electrical Power Systems Quality second edition, New York, McGraw-Hill, 2004 519 p.

5.3.9. Fluctuaciones de tensión – Flicker

El flicker es el efecto producido sobre la percepción visual humana por una emisión cambiante de luz debido a iluminación sujeta a fluctuaciones en la tensión de suministro en baja tensión. Las fluctuaciones de tensión consisten de una secuencia de rápidos cambios de tensión espaciadas lo bastante cerca en el tiempo para simular la respuesta del ojo-cerebro definida como flicker. [3,8]

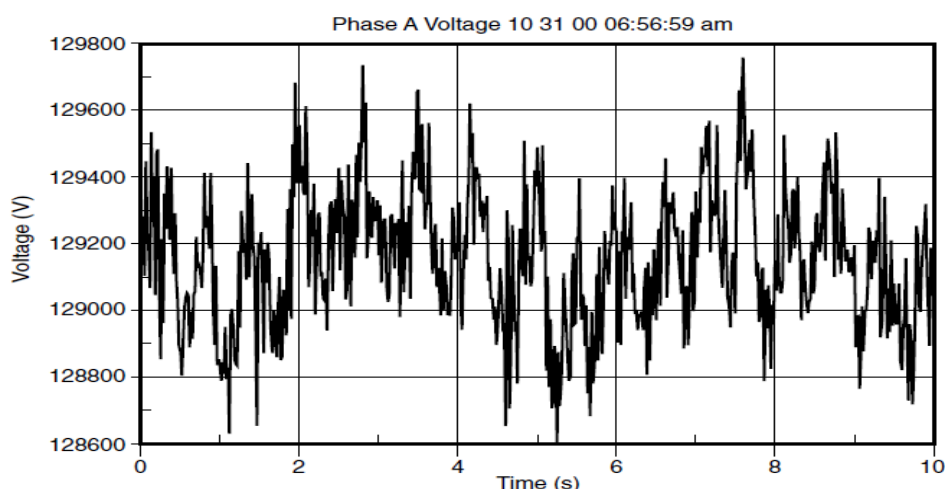
A ciertas frecuencias, el ojo puede percibir el efecto de muy pequeñas fluctuaciones de tensión sobre la iluminación. La mayoría de los equipos, sin embargo, no son afectados por éste fenómeno. [8]

El flicker se produce por variaciones repetitivas de tensión generadas por cargas industriales como máquinas soldadoras, hornos de arco, cargas variables, entre

otros. El flicker es un fenómeno que no sólo perturba la calidad de la potencia, sino que afecta la calidad de la visión en luminarias; por eso el flicker se evalúa mediante su duración mediante un período denominado P_{lt} (Severidad de Larga Duración), el cual evalúa el impacto del flicker.

En el gráfico 13 se ilustra un ejemplo de perturbación flicker causada por un horno de arco.

Gráfica 13. Registro de medición de nivel de tensión de flicker generado por un horno de arco.



Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, Surya Santoso, H Wayne Beaty, Electrical Power Systems Quality second edition, New York, McGraw-Hill, 2004 519 p.

5.3.10. Variaciones de frecuencia de alimentación

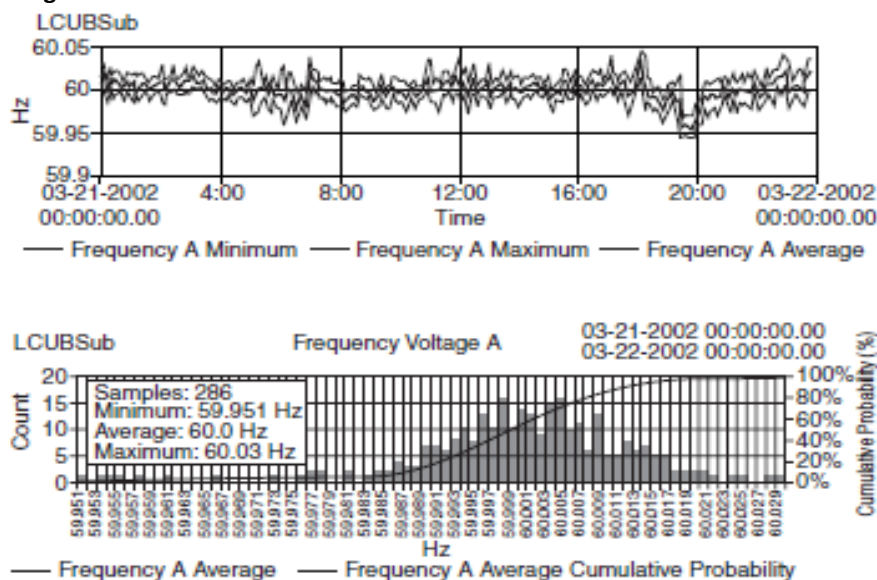
La variación de frecuencia de alimentación es la desviación del valor nominal de frecuencia, es decir, cualquier valor diferente al valor de frecuencia establecido (Ej. 50 o 60 Hz).

La frecuencia de alimentación del sistema depende de la velocidad de los generadores que alimentan dicho sistema de potencia. Hay leves variaciones en frecuencia como el balance dinámico entre la carga y los cambios de necesidad de generación; la variación de frecuencia depende de las características de las cargas, y la respuesta al sistema de control de generación a cambios de carga.

Estos cambios de frecuencia por lo general se debe a la súbita desconexión de cargas al sistema, o a un sistema de generación aislado del resto de sistemas de potencia, sea como fuere, estas variaciones no son tan comunes en los sistemas modernos. [2,3]

En el gráfico 14 se ilustra un gráfico y un espectro de frecuencias de un ejemplo de variación de frecuencia, según un ejemplo del *Dranetz BMI Electrotek Concepts*.

Gráfica 14. Registro de medición de niveles de ruido en una onda de tensión.

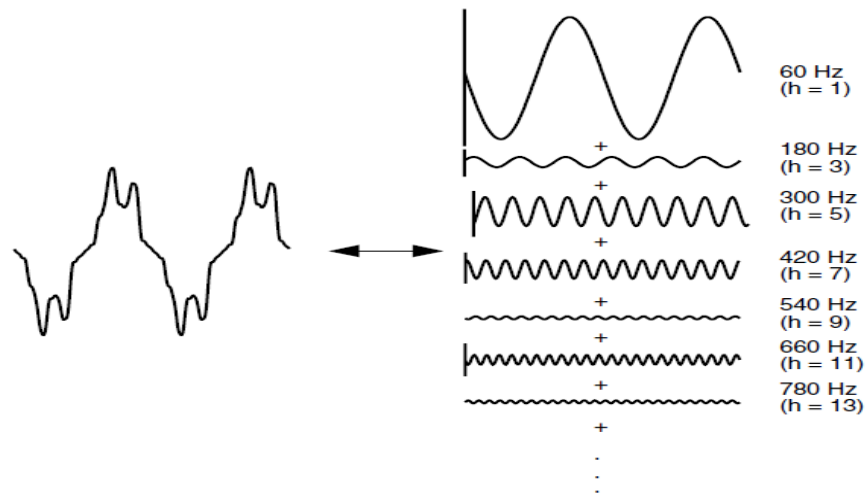


Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, Surya Santoso, H Wayne Beaty, *Electrical Power Systems Quality* second edition, New York, McGraw-Hill, 2004 519 p.

5.4. ARMÓNICOS

Los armónicos son ondas sinusoidales cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental (60 Hz), según lo establecido por el teorema de Fourier, el cual expresa que cualquier señal puede ser descompuesta en una serie de senos y cosenos con una frecuencia fundamental y una serie de múltiplos enteros de esta; como se expresa a continuación en el gráfico 15. [2,8]

Gráfica 15. Ejemplo de sumatoria de armónicos para generar una forma de onda.



Augusto Abreu. Calidad de potencia eléctrica en redes de distribución. Normas Técnicas. (Junio 2005) p. 34.

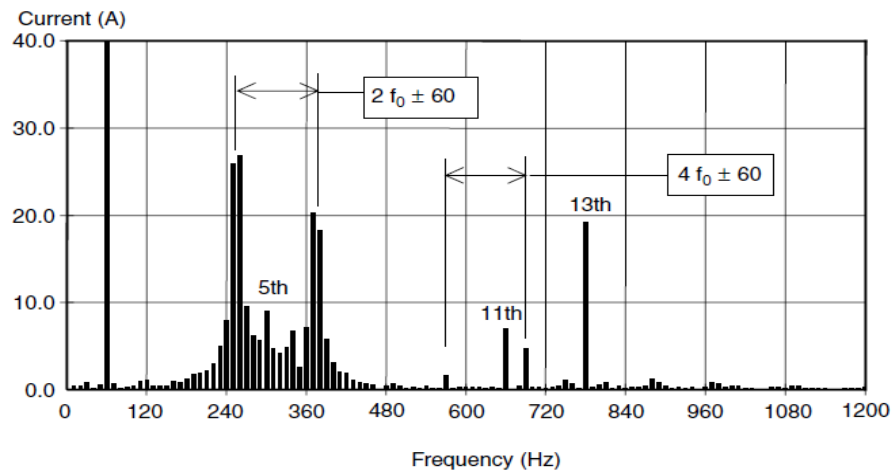
Al ser estos armónicos componentes de un sistema trifásico, se dice que hay una serie de armónicos de secuencia positiva, negativa, y homopolar, la cual está dada por las siguientes ecuaciones. [9]

- Armónicos de secuencia positiva: Orden $3n+1$; $n=1,2,3,\dots$ infinito
- Armónicos de secuencia negativa: Orden $3n-1$; $n=1,2,3,\dots$ infinito
- Armónicos de secuencia homopolar: $3n$; $n=1,2,3,\dots$ infinito

5.4.1. Otros tipos de armónicos

Además de los armónicos mencionados anteriormente, se encuentran otros armónicos menos frecuentes, como los *subarmónicos* e *interarmónicos* que son armónicos cuyas frecuencias son múltiplos NO enteros de la frecuencia fundamental, menor que la unidad y mayor que la unidad respectivamente. Aunque son significativamente menos encontrados en la empresa, se presentan bajo ciertas condiciones como cargas variables controladas mediante PWM, o sistemas de arco eléctrico variable. En el gráfico 16 se expone un contenido espectral de una medición de interarmónicos. [3]

Gráfica 16. Registro de frecuencias interarmónicas en un horno de arco.

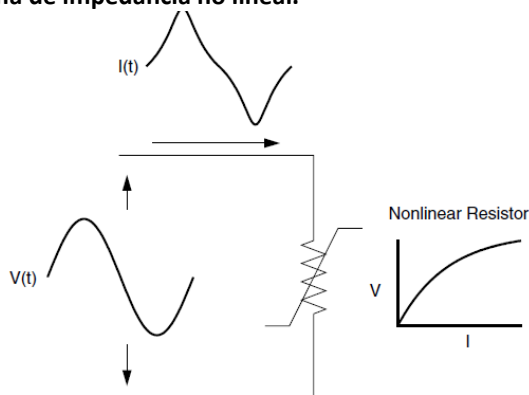


Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, Surya Santoso, H Wayne Beaty, Electrical Power Systems Quality second edition, New York, McGraw-Hill, 2004 519 p.

5.4.2. Causas de armónicos

Al ver el fenómeno de armónico a nivel de industria, y como perturbación de calidad de la potencia, se preguntan muchas veces cual es la causa que permite la aparición de dicha perturbación en un sistema de potencia, y principalmente se debe a cargas no lineales (tales como semiconductores), es decir, cargas que no se comportan ante una respuesta de tensión y corriente con una impedancia constante sino que varían de manera no lineal esta relación, modificando la frecuencia de respuesta; un ejemplo se ilustra en el gráfico 17. [3,9]

Gráfica 17. Ejemplo de sistema de impedancia no lineal.



Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, Surya Santoso, H Wayne Beaty, Electrical Power Systems Quality second edition, New York, McGraw-Hill, 2004 519 p.

A continuación se mencionan las principales fuentes de armónicos en la industria. [9]

- Hornos de arco y otros elementos de descarga de arco, tales como lámparas fluorescentes.
- Núcleos magnéticos en transformadores y máquinas rotativas que requieren corriente de tercer armónico para excitar el hierro.
- La corriente Inrush de los transformadores produce segundo y cuarto armónico.
- Controladores de velocidad ajustables usados en ventiladores, bombas y controladores de procesos.
- Switches en estado sólido que modulan corrientes de control, intensidad de luz, calor, etc.
- Fuentes controladas para equipos electrónicos.
- Rectificadores basados en diodos o tiristores para equipos de soldadura, cargadores de baterías, etc.
- Compensadores estáticos de potencia reactiva.
- Estaciones en DC de transmisión en alta tensión.
- Convertidores de AC a DC (inversores).

5.4.3. Efectos de los armónicos

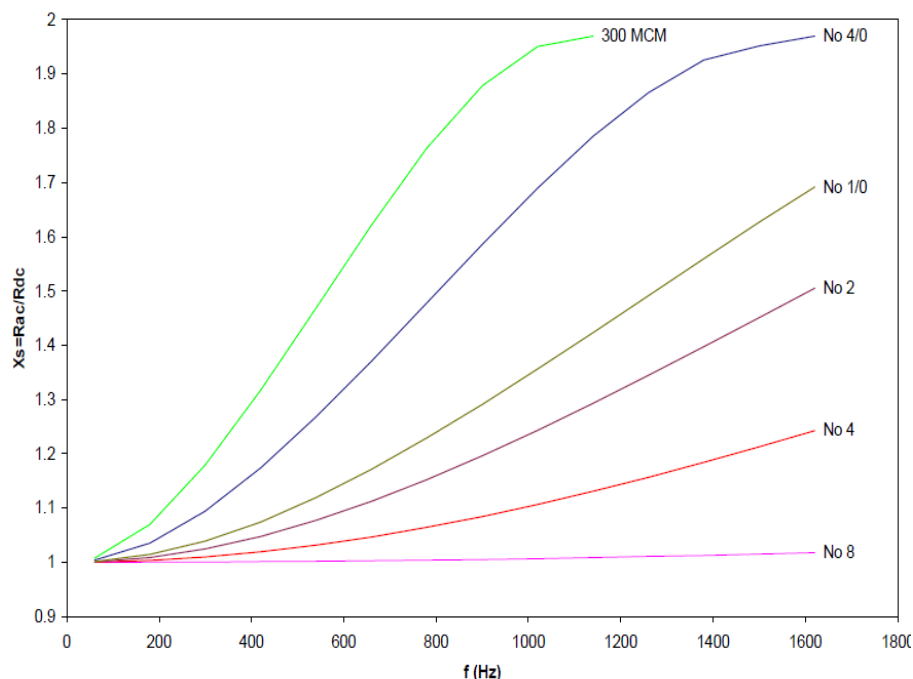
Se pueden mencionar muchos efectos de armónicos en un sistema de potencia, debido a que es una de las perturbaciones de calidad de potencia más encontradas, sin embargo aquí se exponen unas de las más comunes según la NTC 5000. [8]

- Aumento de pérdidas y calentamiento en equipo eléctrico.
- Registros incorrectos en equipos de control y monitoreo.
- Sobre calentamiento del equipo rodante, transformadores y conductores eléctricos.
- Aumento en niveles de ruido audible de equipos eléctricos.
- Fallas en aislamientos de equipos eléctricos
- Dificultad en arranques de procesos
- Fallas u operación prematura de dispositivos de protección,
- Condiciones de resonancia armónica en el sistema de Potencia eléctrica del usuario, deteriorando la operación y confiabilidad del sistema y los equipos.

- Fallas de sincronización de disparo en equipos tales como variadores de velocidad.
- Sobre o sub facturación de energía por alteración del valor rms de la tensión y/o corriente que pasa por el medidor de energía

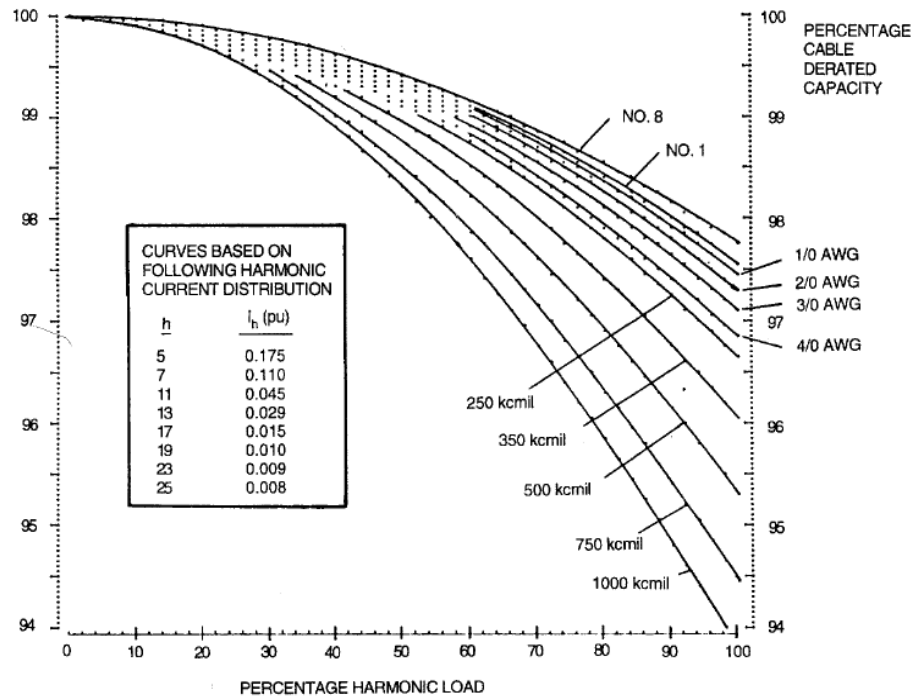
Otro de los efectos de los armónicos que genera drásticos recalentamientos en los conductores es el generado por el efecto piel, que menciona que la energía a altas frecuencias siempre tiende a viajar por el borde de los conductores, lo que genera un choque de electrones en esa zona recalentándolos y generando pérdidas de energía que se disipan en forma de calor al aire. En el gráfico 18 se presenta el efecto piel en los diferentes calibres de los conductores a altas frecuencias y su comportamiento a nivel de impedancia. En el gráfico 19 se presenta el efecto de pérdidas en los conductores debido a armónicos generados por un convertidor AC – DC de seis pulsos. [9,10]

Gráfica 18. Efecto piel en los diferentes calibre y diferentes frecuencias.



José Daríel Arcila, Armónicos En Sistemas Eléctricos, Efectos de los armónicos. p. 6

Gráfica 19. Efecto de pérdidas en los conductores debido a armónicos de rectificación de 6 pulsos.



Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, Surya Santoso, H Wayne Beaty, Electrical Power Systems Quality second edition, New York, McGraw-Hill, 2004 519 p.

5.4.4. Índices de armónicos

Al momento de evaluar el nivel de armónicos en un sistema, existen dos índices que permiten dar exactitud y establecer niveles en dichos armónicos a nivel de corriente y a nivel de tensión. Estos índices son:

- THD (Total Harmonic Distortion o Distorsión Armónica Total)
- TDD (Total Demand Distortion o Distorsión Total de la Demanda)

5.4.4.1. THD (Total Harmonic Distortion)

El THD es una medición del valor efectivo de los componentes armónicos de una señal distorsionada, es decir, el aporte relativo de los armónicos en la fundamental. Puede ser hallado para corriente y tensión de acuerdo a la fórmula (6). [3]

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h>1}^{h_{max}} Mh^2}}{M_1} \quad \text{Ecuación 6}$$

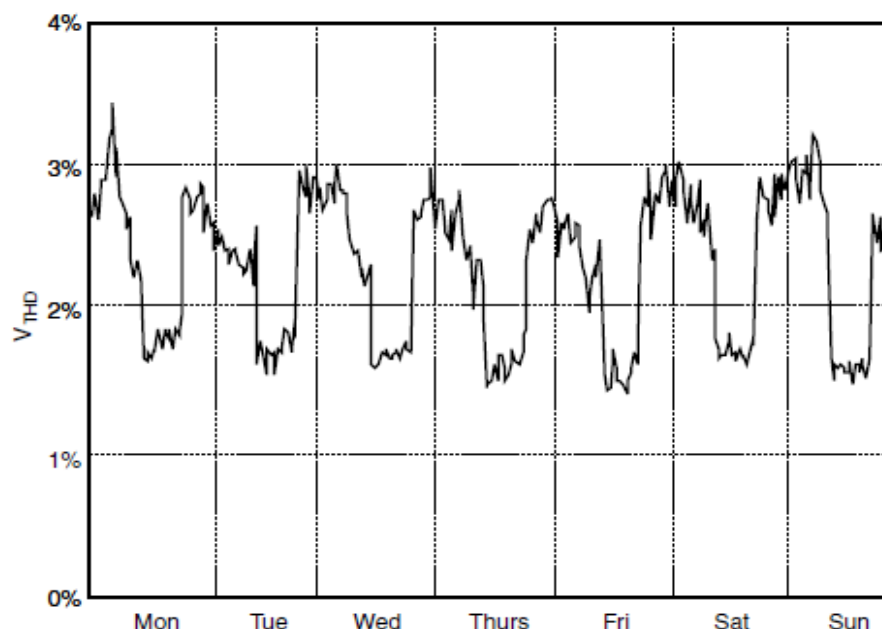
Donde h = Orden del armónico; M = Variable a evaluar (Corriente o Tensión); M_1 = Nivel fundamental de la variable a evaluar

El THD es un índice muy útil en diferentes aplicaciones, pero también tiene sus limitaciones. Un ejemplo es que puede indicar las pérdidas adicionales de corriente que atraviesa un conductor, pero no es un buen indicador de tensión en un capacitor puesto que el THD sólo evalúa valores pico, y no valores en estado estable. [3]

Este índice THD se utiliza constantemente para referenciar distorsión armónica de tensión. Como se menciona en la fórmula, estos niveles de tensión armónicos son siempre referidos al valor de la fundamental.

Las variaciones en el THD siempre obedecen a un patrón de tiempo debido a la conexión y desconexión de cargas no lineales, como en el ejemplo que se expone a continuación en el gráfico 20 que presentan los niveles de THD de una subestación de distribución que alimenta un sector residencial. Esta medición fue tomada durante una semana que es el mínimo período de evaluación de THD para poder obtener resultados significativos. [3]

Gráfica 20. Ejemplo variación THD en una semana.



Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, Surya Santoso, H Wayne Beaty, *Electrical Power Systems* Quality second edition, New York, McGraw-Hill, 2004 519 p.

5.4.4.2. TDD (Total Demand Distortion)

Los niveles de distorsión de corriente pueden ser caracterizados mediante el THD, pero pueden ser inadecuados, puesto que una corriente pequeña puede tener un alto índice de THD pero no significar una amenaza para el sistema de potencia. Por ejemplo existen cargas de velocidad variable que describen niveles de THD altos cuando manejan cargas livianas.

Debido a esto algunos especialistas, optaron por referir el THD a la corriente pico fundamental, en lugar de a una muestra de corriente fundamental. Esto se conoce como TDD según el estándar IEEE 519 – 1992, *Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*. [3,10]

Este índice se define como:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} I_h^2}}{I_L} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde I_L es la corriente pico a frecuencia fundamental medida en el punto de conexión común (PCC), e I_h es la corriente a nivel armónico h .

5.4.5. Evaluación de armónicos en comparación con la normativa

La actualización de nuevas tecnologías electrónicas en la industria, han aumentado seriamente en los últimos años, las perturbaciones de calidad de la potencia como armónicos y otros fenómenos, ha llevado a establecer normativa que permitan mantener un nivel mínimo de armónicos que permita a usuarios finales y a comercializadores de red mantener niveles óptimos de calidad de la potencia en los sistemas de distribución, para de este modo evitar fallas que pudieran comprometer la integridad del sistema.

Existen normas y referencias, en cuanto a evaluación de armónicos se refiere, lo que permiten tener en claro los límites a ser evaluados para cada aplicación a ser medida. Entre las normas que establecen límites de evaluación de calidad de potencia se encuentran:

- IEEE 519-1992 (IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems)
- Normativa Europea EN 50160 (Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución)
- Norma Técnica Colombiana NTC 5000 (Calidad de la Potencia Eléctrica -CPE-. Definiciones y términos fundamentales)
- Resolución CREG N° 024 del 2005

Estas normas dictaminan un límite según el cual valores de referencia deben ser llevados a un nivel mínimo que permitan una óptima operación del sistema de potencia.

5.4.5.1. IEEE 519 – 1992

El estándar IEEE 519 – 1992 surge principalmente del hecho del aumento de cargas no lineales en sistemas eléctricos tales como convertidores de tensión, variadores de velocidad y diferentes dispositivos electrónicos. Estos dispositivos electrónicos al ser de una impedancia no lineal presentan una respuesta no convencional a diferencia de elementos lineales (Resistencias, capacitores, e inductores) generando tensiones y corrientes armónicas, así como fallas de factor de potencia, e incluso condiciones de resonancia con el sistema. Este estándar también fue creado como guía para sistemas de potencia que incluyeran cargas no lineales, e inclusive está diseñada para orientar situaciones de niveles armónicos y otras situaciones consideradas “más críticas”; con la única excepción de perturbaciones de tipo transitorio que excede los límites de la misma norma. [10]

Los límites armónicos en corriente y tensión del estándar IEEE 519 – 1992 son referidos al PCC o Punto de Conexión Común. Este es el punto donde los usuarios finales comparten la misma red, o donde pueden conectarse nuevos clientes en el futuro. El objetivo de este estándar es asignar justamente responsabilidades en la cuota de armónicos para el operador de red y para el usuario final. Sin embargo este estándar asigna límites de inyección de corrientes armónicas basado en el tamaño de la carga con respecto al tamaño del sistema de potencia. La relación utilizada es dada por la proporción entre corriente máxima de cortocircuito en el PCC, en comparación con la corriente máxima de carga. [3,12]

En la tabla 6.2 se exponen los límites de distorsión armónica en corriente según el estándar IEEE 519 – 1992 en diferentes sistemas (Distribución, Transmisión y Generación); también se presenta el límite del TDD (Total Demand Distortion); estos límites son acogidos en diferentes normas internacionales y también en las normas colombianas tales como la NTC 5000 y la resolución CREG N° 024 del 2005 como se menciona posteriormente. En la tabla 6.3 se presenta un resumen de los estándares IEEE relacionados con armónicos publicados hasta la fecha.

Tabla 2. Relación de límites de distorsión armónica en sistemas de potencia.

Límites de distorsión en corriente para sistemas de distribución 120 V < Vn ≤ 69 kV						
Relación Icc/IL	<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	h≥35	TDD
<20*	4	2	1,5	0,6	0,3	5
20 < 50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
50 < 100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
100 < 1000	12	5,5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2,5	1,4	20
Límites de distorsión en corriente para sistemas de sub-transmisión 69 Kv < Vn ≤ 161 Kv						
Relación Icc/IL	<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	h≥35	TDD
< 20	2	1	0,75	0,3	0,15	2,5
20 < 50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4
50 < 100	5	2,25	2	0,75	0,35	6
100 < 1000	6	2,75	2,5	1	0,5	7,5
>1000	7,5	3,5	3	1,25	0,7	10
Límites de distorsión en corriente para sistemas de transmisión (Vn > 161 Kv) Generación distribuida y cogeneración						
Relación Icc/IL	<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	h≥35	TDD
< 25	1	0,5	0,38	0,15	0,1	1,5
25 < 50	2	1	0,75	0,3	0,15	2,5
≥ 50	3	1,5	1,15	0,45	0,22	3,75

IEEE 519-1992. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, (Junio 2004) p. 72

Tabla 3. Resumen de estándares IEEE relacionados con armónicos.

Número y Título de la Norma	Objetivos y Funciones
IEEE 1159-1995. "Monitoring Electric Power Quality".	Esta establece como, donde, por qué, cuando, etc. monitorear los parámetros de la calidad de potencia. Su sección más referenciada es la tabla que clasifica o caracteriza fenómenos de calidad de potencia.
IEEE/ANSI 519-1992, "Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems".	Esta recomendación establece límites de armónicos tanto de tensión como de corriente en un punto común de acoplamiento. Para la tensión se establecen límites en función del nivel y el de corriente en función del nivel de corto circuito y la máxima corriente de carga.
IEEE/ANSI C57-110-98. "Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Non-sinusoidal Load Currents".	Esta norma establece el procedimiento para calcular el tamaño adecuado y factor K de transformadores para alimentar cargas no lineales.
IEEE Std 1100-1999 (Emerald Book). "Recommended Practice for Powering and Grounding Sensitive Equipment".	Esta establece recomendaciones en el cableado y puesta a tierra para instalaciones con cargas sensitivas.
ANSI C84.1-1995. "Electric Power Systems and Equipment – Voltage Ratings".	Esta norma ANSI establece los niveles de tensión normalizado y sus niveles de regulación desde baja, media y alta tensión.

Augusto Abreu. Calidad de potencia eléctrica en redes de distribución. Normas Técnicas. (Junio 2005) p. 82.

5.4.5.2. EN 50160

Se conoce a EN 50160 como una norma europea aprobada por el CENELEC (Comité Europeo para la Estandarización Electrotécnica) en 1994; que describe las características principales de tensión suministrada por una red general de distribución en baja y media tensión en condiciones normales de operación. Esta norma expone los límites o los valores de las características de la tensión que todo cliente tiene derecho a esperar únicamente en el punto de conexión común (PCC) y no en el sistema de distribución o en las instalaciones de uso final. [11,12]

Los límites de tensión armónica suministrados por la norma EN 50160 están dadas en porcentaje de la tensión fundamental. La norma menciona que el THD de la tensión de alimentación incluyendo armónicos hasta el orden (h) 40 no debe exceder el 8%. En la tabla 6.4 se exponen los límites de porcentaje de tensión armónica establecidos por la EN 50160. [3]

Tabla 4. Relación expresada en porcentaje de tensión nominal.

Armónicos impares				Armónicos pares	
No múltiplos de 3		Múltiplos de 3			
Orden h	Tensión Relativa	Orden h	Tensión Relativa	Orden h	Tensión Relativa
5	6%	3	5%	2	2%
7	5%	9	1,5%	4	1%
11	3,5%	15	0,5%	6...24	0,5%
13	3%	21	0,5%		
17	2%				
19	1,5%				
23	1,5%				
25	1,5%				

Norma UNE EN 50160. Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución. (Enero 2001) p. 13.

5.4.5.3. Normatividad Técnica Colombiana

En el medio colombiano se encuentran normas y resoluciones que hacen referencia a límites de calidad de la potencia que establecen un marco de referencia de los estándares de calidad de potencia, en conformidad con las diferentes normas internacionales.

En el año 2004 empezó el proyecto de Norma Técnica Colombiana referente a calidad de potencia llamada NTC 5000 “CALIDAD DE LA POTENCIA ELECTRICA -CPE-. DEFINICIONES Y TERMINOS FUNDAMENTALES.” La cual ya se encuentra vigente como norma y se referencia en normativa internacional como las anteriormente mencionadas IEEE 519 – 1992. [4,10]

También en la resolución de la Comisión de Regulación de Energía y Gas “CREG” N° 024 de 2005 se establece el límite de distorsión armónica total en tensión

(THD_V) referenciado en la norma IEEE 519 – 1992, el cual se expone en la tabla 6.5. [5,10]

Tabla 5. Nivel de THD_V mínimo para sistemas de potencia.

Tensión del Sistema	THDV Máximo (%)
Niveles de Tensión 1,2 y 3	5,0
Niveles de Tensión 4	2,5
STN	1,5

IEEE 519-1992. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems (Junio 2004) p. 72

5.4.6. Soluciones frecuentes a problemas de armónicos

A nivel de ingeniería existen varios dispositivos diseñados para controlar dispositivos para el control de armónicos, tan simples como un banco de condensadores o una reactancia de línea, o tan complejos como filtros activos o pasivos de frecuencia basados en dispositivos electrónicos de potencia. [3]

Otras alternativas para solucionar problemas de armónicos se mencionan a continuación. [2]

- Redistribuir las cargas y/o separar circuitos para aislar los equipos causantes de problemas o de los circuitos sensibles.
- Emplear transformadores y alimentaciones dedicadas.
- Duplicar al doble o más la sección de los conductores de neutro para el caso de instalaciones con cargas no lineales que contaminan con el tercer armónico.
- Aumentar el nivel de corto circuito del sistema eléctrico.
- Instalación de transformadores con factor K superior.

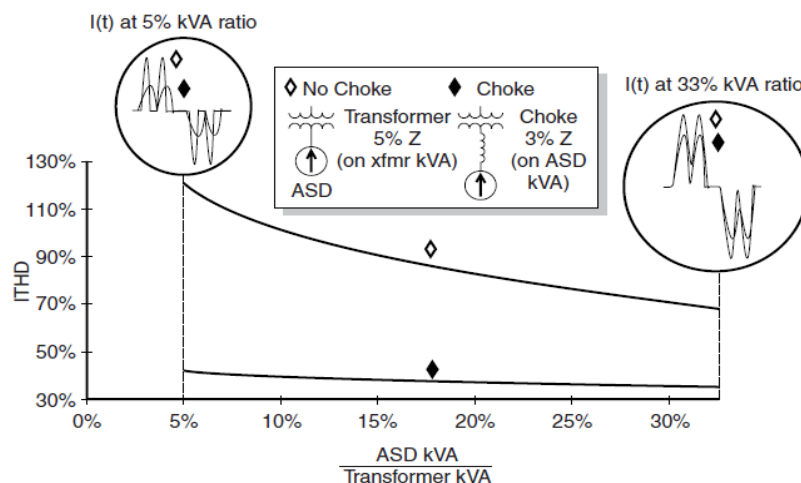
Las soluciones anteriormente mencionadas no reducen la contaminación armónica, simplemente ocultan el problema haciendo más robusto el sistema eléctrico. A continuación se exponen las soluciones que si ofrecen una reducción de los niveles de contaminación armónica en el sistema de potencia.

5.4.6.1. Reactancias de línea o choque

Una solución sencilla a problemas de armónicos es la ubicación en la red de distribución de inductancias de línea; esta solución es muy útil cuando se

producen armónicos por dispositivos de variación de velocidad que utilizan circuitos de modulación PWM. En el gráfico 21 se ilustra un ejemplo de niveles de THD_i comparando el uso de reactancias de línea. [3]

Gráfica 21. Gráfico comparativo de THD_i utilizando reactancia de línea.



Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, Surya Santoso, H Wayne Beaty, Electrical Power Systems Quality second edition, New York, McGraw-Hill, 2004 519 p.

5.4.6.2. Filtros de armónicos

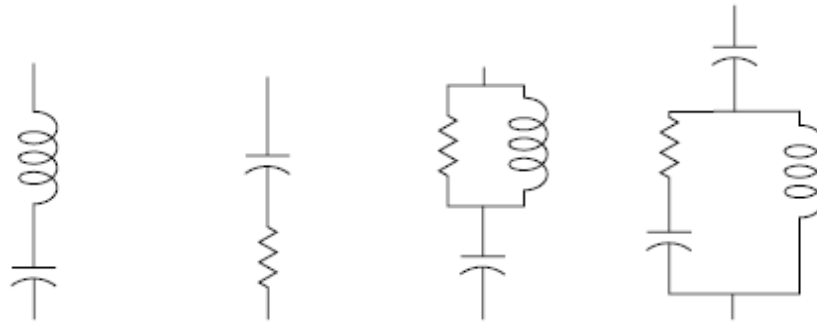
Existen 3 tipos de filtros de armónicos que ofrecen soluciones de mitigación de armónicos, los cuales son:

- Filtros pasivos
- Filtros activos
- Filtros híbridos

5.4.6.2.1. Filtros pasivos

Los filtros pasivos son elementos utilizados para la mitigación de armónicos, basados en resistencias e impedancias capacitivas e inductivas. Generalmente es la conexión en serie o en paralelo de estos elementos, en el gráfico 22 se ilustran las conexiones más comunes de filtros pasivos, teniendo en cuenta que de acuerdo a la construcción de estos filtros varía el espectro armónico que se desea eliminar.

Gráfica 22. Diferentes arreglos de filtros pasivos.



Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, Surya Santoso, H Wayne Beaty, Electrical Power Systems Quality second edition, New York, McGraw-Hill, 2004 519 p.

El dimensionamiento de filtros puede ser tal que los condensadores del filtro sirvan también como parte de la compensación del factor de potencia. No existen realmente reglas específicas para el diseño de filtros y es en gran parte la experiencia y el ensayo y error los métodos que ofrecen un mejor resultado. [3,9]

Entre las características de estos filtros se pueden mencionar. [2]

- Sus características son restringidas (porque generalmente están sintonizados a una sola frecuencia).
- Tienen un menor costo el equipo y su mantenimiento comparado con los filtros activos.
- Pueden construirse utilizando condensadores de corrección del factor de potencia.
- Tienen buen rendimiento energético (pocas pérdidas), excepto en los filtros pasa banda u otros filtros complejos que incluyen resistencias.
- No requieren mantenimiento especial.
- Poseen la desventaja de entrar en etapa de resonancia con las diferentes frecuencias armónicas.

5.4.6.2.2. Filtros activos

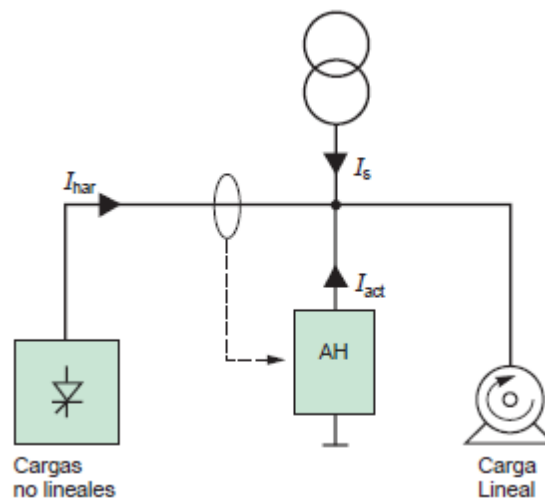
Los sistemas de filtros activos de corrección de armónicos a diferencia de los filtros pasivos no trabajan mediante filtrado de una frecuencia específica, sino que mediante mediciones se encarga de determinar el nivel de armónicos en la red,

para de este modo inyectar corrientes armónicas de fase opuesta que cancelen el nivel de frecuencias armónicas. [13]

Como se menciona anteriormente el filtro activo no se enfoca en una frecuencia específica de construcción como el filtro pasivo, sino que crea una forma de onda en tiempo real en base a los aportes de los circuitos de detección, independientemente de las frecuencias asociadas a cargas no lineales. [13]

En el gráfico 23 se presenta el principio de funcionamiento del filtro activo que muestra el nivel de compensación armónica de nivel inverso a las corrientes armónicas producidas por cargas no lineales ($I_{act} = -I_{har}$). [14]

Gráfica 23. Principio de funcionamiento de filtro activo.



Schneider Electric, Detección y Filtrado de Armónicos, Aumento de las pérdidas, p. 6

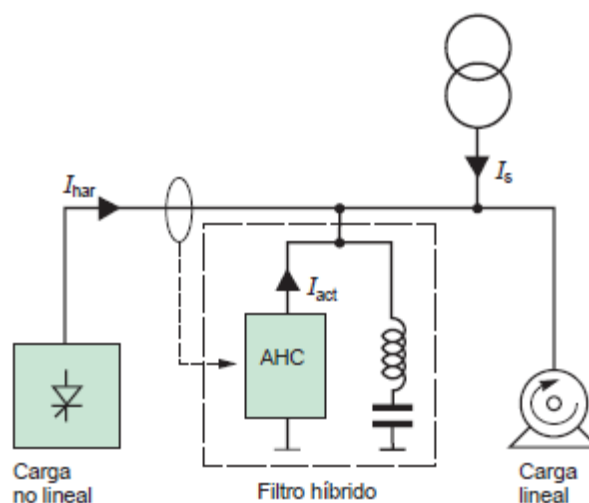
Entre las ventajas y desventajas de estos filtros se pueden mencionar. [2,14]

- Sus características son muy flexibles (dentro de ciertos límites, se pueden adaptar a las frecuencias que deben ser filtradas).
- Tienen un mayor costo comparado con los filtros pasivos.
- Es necesario protegerlos contra sobretensiones en la red.
- Tiene necesidad de un mantenimiento especial.
- Es difícil la construcción de un filtro con elevadas especificaciones de potencia.

5.4.6.2.3. Filtros híbridos

Estos filtros combinan las mejores características de filtros activos y pasivos tales como alta flexibilidad de corrección de frecuencia armónica, como niveles operables de potencia; también facilitan la respuesta a impedancia del sistema así como los niveles de resonancia. El gráfico 24 presenta el principio de funcionamiento de un filtro híbrido. [2,14]

Gráfica 24. Principio de funcionamiento de filtro híbrido.



Schneider Electric, Detección y Filtrado de Armónicos, Aumento de las pérdidas, p. 6

5.5. APLICACIONES DE ANÁLISIS DE SISTEMAS DE POTENCIA

La planeación, diseño, y operación de sistemas de potencia industrial y comercial, requieren estudios de ingeniería para evaluar el desempeño existente y propuesto del sistema de potencia, así como su confiabilidad, seguridad, y análisis económico. Estos estudios de ser bien planificados son formas de prevenir situaciones y optimizar la selección de equipos. En la etapa de diseño, los estudios identifican y evitan potenciales deficiencias en el sistema antes de entrar en operación. En sistemas existentes, estos estudios permiten localizar la causa de fallas en los equipos, del mismo modo que determinan medidas correctivas para el desempeño adecuado del sistema de potencia. [15]

Existen varios tipos de análisis de sistemas de potencia entre los cuales cabe mencionar:

- Estudios de flujo de carga
- Estudios de corto circuito
- Estudios de estabilidad
- Estudios de arranque de motores
- Estudios de análisis armónicos
- Estudios de transientes
- Estudios de confiabilidad
- Estudios de conductores
- Estudios de tierra
- Estudios de coordinación de protecciones
- Estudios de alimentación auxiliar DC

5.6. ANÁLISIS DE ARMÓNICOS

Una carga que produce armónicos puede afectar otras cargas si estos armónicos generan una distorsión significativa. La distorsión de la tensión causada por la carga que genera armónicos es una función tanto de la impedancia del sistema, como de la corriente armónica inyectada. Aunque el hecho que exista una corriente armónica distorsionada no siempre significa que habrá efectos en las demás cargas del sistema. Si la impedancia del sistema es baja, la distorsión de tensión es casi nula en ausencia de una resonancia armónica. Sin embargo si prevalece la resonancia armónica, se generaran tensiones y corrientes armónicas indeseadas. [15]

Unas de las principales causas de la distorsión armónica son:

- a. Interferencia y falla en sistemas de control
- b. Recalentamiento de máquinas giratorias
- c. Sobrecalentamiento y falla de bancos de condensadores

Un análisis de armónicos se hace para verificar que el nivel de distorsión armónica se encuentre dentro de límites establecidos por normas internacionales (IEEE 519-1992, EN 50160, IEC 61000-3-6), con el fin de solucionar posibles fallas y

alternativas de solución que se pudieran encontrar en un sistema con este tipo de perturbación de calidad de la potencia. [3]

Entre los objetivos de un estudio de calidad de la potencia cabe encontrar [4]:

- Solucionar un problema de mal funcionamiento o de daños en equipos eléctricos relacionados a la fuente de alimentación
- Identificar los problemas relacionados con la calidad de la potencia que ocasionen paros o alteraciones en los procesos.
- Identificar y corregir fuentes de interferencia en una instalación o red eléctrica.
- Determinar el estado de una red a la luz de las normas de calidad de la potencia eléctrica.

5.6.1. Información necesaria para un estudio de calidad de potencia

Para la adecuada realización de un estudio de calidad de la potencia, sea en el sector industrial, comercial, e incluso residencial, es necesario levantar una información de línea base que permita identificar los datos y mediciones necesarias, para determinar finalmente el estado de calidad de la potencia en la instalación o sistema de potencia.

Entre la información necesaria para el levantamiento de un estudio de calidad de la potencia se encuentra [4,7]:

- Diagramas unifilares generales y datos de los transformadores de potencia.
- Datos de los cables, cargas y bancos de condensadores.
- Descripción del problema, incluyendo el tiempo de ocurrencia y la periodicidad.
- Identificación de los equipos afectados, datos técnicos y su localización tanto física como eléctrica (Garantía).
- Investigación de posibles causas de origen. (Equipos electrónicos, hornos de arco, entre otros)
- Comportamiento de las protecciones en los eventos de fallas y/o perturbaciones.

- Revisión de conexión de los conductores.
- Ciclos de producción (planta industrial).
- Cuentas de energía activa y reactiva.
- Características de las cargas generadoras de armónicos (rectificadores, reguladores, variadores, UPS's, etc.).
- Registros de mediciones de calidad de potencia anteriores

5.7. MEDICIONES DE CALIDAD DE POTENCIA

Las mediciones de las perturbaciones de calidad de potencia anteriormente mencionadas deben estar en consenso con la norma IEC 61000-4-30 (Técnicas de medida y ensayo), según lo establece la Norma Técnica Colombiana NTC 5000 de Calidad de la Potencia. [8]

5.7.1. Importancia de medición de armónicos

Las mediciones de corriente y tensiones armónicas son esenciales para la distribución confiable de energía eléctrica. Algunas razones presentadas a continuación exponen la importancia de la medición de armónicos en un sistema de potencia según la norma IEEE 519 – 1992. [10]

1. Monitorear valores existentes de armónicos y verificar sus valores de acuerdo a niveles admisibles.
2. Pruebas y ensayos en equipos generadores de armónicos.
3. Diagnóstico de situaciones en las cuales el desempeño del equipo es inaceptable para el usuario o para el operador de red.
4. Observar patrones de armónicos en períodos de tiempo (Diario, Semanal, Períodos de Proceso).
5. Mediciones de verificación de estudios de simulación de cargas armónicas.
6. Medición de corrientes y tensiones armónicas con su respectiva fase, ángulo y frecuencia. Dichas mediciones pueden hacerse con o sin las cargas no lineales conectadas para hallar la fuente de armónicos y su impedancia en el punto de conexión.

Las técnicas utilizadas para mediciones armónicas difieren de aquellas utilizadas para mediciones convencionales en sistemas de potencia. El ancho de banda de

mediciones armónicas de tensión, corriente y potencia es sustancialmente mayor (en el orden de 3 kHz) a diferencia de mediciones convencionales en sistemas de potencia, donde el ancho de banda es cercano a la frecuencia del sistema (En nuestro caso 60 Hz).

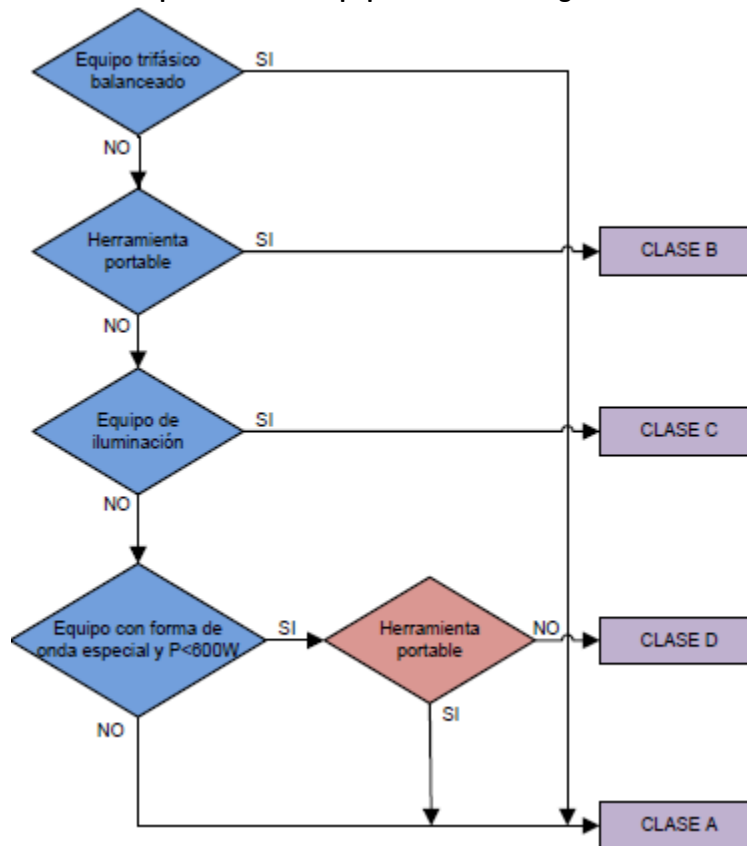
5.7.2. Tipos de medida

La norma NTC 5000 menciona dos tipos de medida que son [1,8]:

- Medidas Clase A: Deben utilizarse medidores clase A, según lo establecido según la norma IEC 61000-4-30, para efectos contractuales, verificación del cumplimiento de valores establecidos según las normas, o en caso de reclamación entre el operador de red y un cliente.
- Medidas Clase B: Deben utilizarse medidores clase B para otros tipos de mediciones, tales como mediciones estadísticas, y estudios de diagnóstico donde no se requiera alta precisión ni exactitud.
- Medidas Clase S: Son un tipo de medidas contempladas entre la Clase A y B, donde se evalúan en menor exactitud algunos parámetros, es más exacta que la clase B, pero menos que la clase A.

Según la norma IEC 61000-3-2 los equipos de medida pueden ser clasificados utilizando el flujograma que se expone a continuación en el gráfico 25. [3,12]

Gráfica 25. Flujograma utilizado para clasificar equipos de medida según la norma IEC 61000-3-2.



Universidad Politécnica Salesiana, Armónicos en las Redes Eléctricas, Normas IEC para Armónicos, p. 49

5.7.3. Equipos de medición de calidad de potencia

Se conocen muchos equipos que sirven para medir diferentes parámetros de calidad de potencia. Hay unos que son muy específicos de acuerdo a la perturbación o fenómeno de calidad de la potencia que se quiera investigar, entre los más comunes cabe mencionar [3]:

- Medidores de tierra
- Multímetros
- Osciloscopios
- Analizadores de espectro
- Medidores de armónicos
- Analizadores de red
- Cámaras termográficas

6. DELIMITACIÓN

6.1. DELIMITACION ESPACIAL

El desarrollo del proyecto está enfocado en la Subestación *Latería* ubicada dentro de la instalación eléctrica de la empresa GRACETALES S.A.

6.2. DELIMITACIÓN CRONOLÓGICA

La elaboración del presente trabajo de grado, fue planteada para su desarrollo en el periodo comprendido entre las fechas del 01 de Junio al 29 de Septiembre del 2012, constituyendo un período de 4 (cuatro) meses de trabajo en grupo (por parte de los integrantes desarrolladores) y acompañamiento docente (por parte del asesor del proyecto), atendiendo un horario estimado de 8:00 am a 5:00 pm, de lunes a viernes.

6.3. ALCANCES

- ✓ Se realizarán mediciones eléctricas que permitan determinar el estado de la instalación eléctrica de la subestación *Latería*.
- ✓ De acuerdo a los resultados obtenidos en las mediciones realizadas, se realizará un estudio de conformidad de niveles de calidad de la potencia de la instalación eléctrica de la subestación *Latería*.
- ✓ Se presentarán recomendaciones que permitan un mejor desempeño en la instalación eléctrica de la subestación de *Latería* de GRACETALES S.A., y en su respectivo sistema de puesta a tierra.
- ✓ Se realizará un estudio de corrección de armónicos mediante la implementación de un filtro activo.

6.4. LIMITACIONES

- ✓ Sólo se realizaran y evaluaran mediciones en la subestación eléctrica *Latería*, sin incluir el resto de la instalación eléctrica de GRACETALES S.A. debido a que es el área en la cual se enfatiza este trabajo.

- ✓ Se mostrará un breve análisis de las termografías presentadas en el trabajo, mediante la identificación de puntos calientes, sin embargo no se realizarán estudios detallados de radiación ni conductividad térmica.
- ✓ El estudio de conformidad de niveles de calidad de la potencia se harán en el marco de la normativa vigente, sin embargo no se harán estudios más profundos que los encontrados en la normativa IEEE 519, EN50160, IEEE C57.12, y NTC 5000.
- ✓ Se realizaron mediciones eléctricas (Mediante analizador de redes) en diferentes puntos de la instalación eléctrica correspondiente a la subestación *Latería*. Sin embargo estas mediciones se realizaron mediante disponibilidad de los equipos y líneas de proceso.
- ✓ Solo se evaluarán armónicos como parámetros de calidad de energía dado a las características de registro del equipo analizador de redes utilizado.
- ✓ Aunque se realizaron mediciones eléctricas en la subestación *Latería*, no se realizaron estudios ni corrección de factor de potencia, aunque el filtro activo que se plantea en el trabajo, tiene como característica adicional la mejora de la calidad de potencia.

7. DISEÑO METODOLÓGICO

El trabajo de grado consiste en un diagnóstico de calidad de potencia de los compresores asociados a la instalación eléctrica de la subestación de latería en la empresa GRACETALES S.A., a partir de este diagnóstico se pueden sugerir varias acciones, como plantear una mejora del estado de calidad de potencia mediante la implementación de un filtro activo de armónicos, y otras recomendaciones que se encuentran identificadas en el desarrollo de éste trabajo de grado.

La metodología del diagnóstico, de acuerdo a la figura 8.1, se desglosa de la siguiente manera:

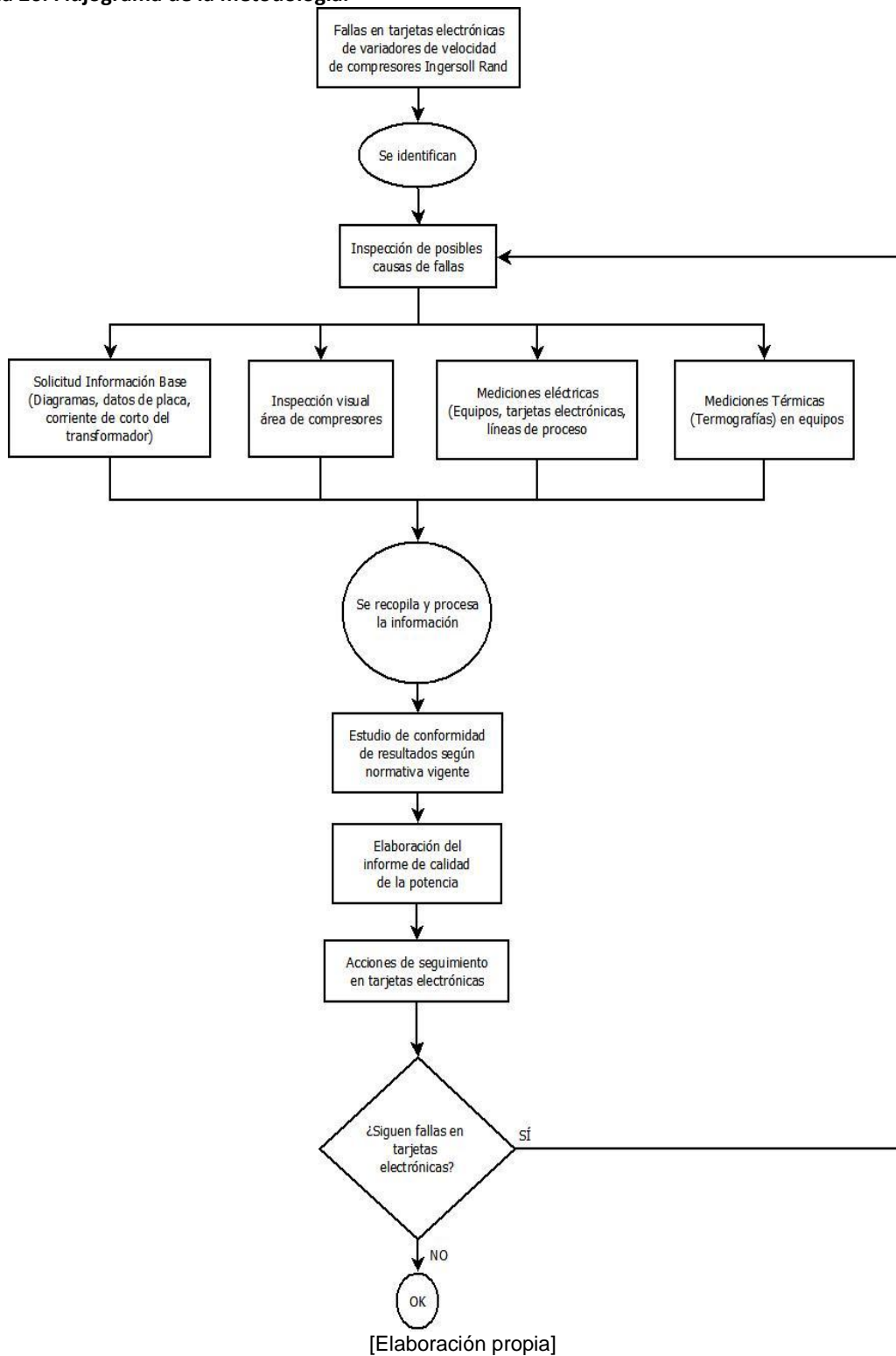
1. Identificación de fallas en el servicio de aire comprimido en el proceso productivo de GRACETALES S.A.
 - Indagación respecto al sucesivo reemplazo de tarjetas electrónicas por parte del fabricante (Ingersoll Rand).
 - Identificación de fallas en tarjetas electrónicas de los variadores de velocidad de los compresores.
2. Planteamiento línea base del estado de la instalación eléctrica subestación *Latería*.
 - Solicitud de información base de equipos e instalación eléctrica a GRACETALES S.A. (Diagramas unifilares, datos de placa).
 - Planteamiento de un cronograma de actividades a realizar.
3. Inspección de posibles causas de fallas en tarjetas electrónicas.
 - Inspección visual en el área de compresores ubicados en la subestación *Latería*.
 - Mediciones eléctricas en equipos, transformadores y líneas de proceso.
 - Mediciones térmicas en equipos.
4. Recopilación y procesamiento de la información
 - Manejo de resultado de las mediciones mediante software especializado. (Power Vision)
5. Estudio de conformidad de los resultados mediante la normativa vigente de calidad de la potencia

- Normativa IEEE (519-1992, C57.12-00-87, 80)
- Normativa Europea (EN 50160)
- Resolución CREG N° 024 del 2005

6. Elaboración del informe final del resultado.

- Planteamiento del estado actual de calidad de la potencia de las tarjetas electrónicas de los compresores de GRACETALES S.A.
- Evaluar una mejora de la calidad de la potencia en las tarjetas electrónicas de GRACETALES S.A. mediante la implementación de un filtro activo.
- Planteamiento del estado futuro de calidad de la potencia de las tarjetas electrónicas de los compresores de GRACETALES S.A. una vez implementado el filtro activo.
- Estudio de viabilidad energética y económica de la mejora propuesta.
- Ahorro de emisiones de CO₂ obtenido a partir de la mejora propuesta.
- Desarrollo de un listado de recomendaciones que mejoren la calidad del sistema eléctrico de la subestación *Latería* de GRACETALES S.A.

Gráfica 26. Flujograma de la metodología.



8. MEDICIONES Y RESULTADOS

8.1. IDENTIFICACIÓN DE FALLAS EN EL SERVICIO DE AIRE COMPRIMIDO EN EL PROCESO PRODUCTIVO

Inicialmente en la empresa GRACETALES S.A. se detectan fallas en las tarjetas electrónicas de los variadores de velocidad de los compresores; las cuales son identificadas por el departamento de mantenimiento, de este modo, solicitan una revisión técnica por parte del fabricante (Ingersoll Rand); el cual hace un reemplazo efectivo de dichas tarjetas. Al término de 4 meses las tarjetas electrónicas vuelven a fallar, y al llamar al fabricante a hacer efectiva la garantía, el fabricante sugiere que se realice un estudio de calidad de la potencia en el compresor que permita esclarecer la causa de los daños.

8.2. SOLICITUD LÍNEA BASE INSPECCIÓN ELÉCTRICA

Se procede a solicitar y levantar información que permita establecer una línea de base para la realización de una inspección eléctrica tal como:

- Diagramas Unifilares.
- Datos de placa de los diferentes equipos.
- Corriente de corto circuito en el punto de conexión del transformador.

Esta información en conjunto con las mediciones (eléctricas y térmicas) a ser realizadas permitirán identificar el estado de la instalación eléctrica correspondiente a la subestación Latería.

8.3. INSPECCIÓN VISUAL INSTALACIÓN ELÉCTRICA *LATERÍA*

Se procede a hacer una inspección visual que permita identificar el estado de la instalación eléctrica Latería, mediante visitas programadas y diagnósticos visuales en los diferentes equipos como compresores, líneas de proceso y transformadores, donde se pudieran identificar posibles fallas que pudieran ser corregidas y solucionadas en el caso de mejorar el estado de las tarjetas electrónicas de variación de velocidad de los compresores. De acuerdo a las políticas de la empresa no se permitieron fotografías a los diferentes equipos, con

excepción de las mediciones termográficas realizadas en los tableros de distribución.

El área de latería de la empresa Gracetales cuenta con un transformador trifásico de 300 kVA que reduce la tensión de 13.200 a 440 voltios y es el encargado de suministrar la energía a dos compresores de 100 HP marca Ingersoll Rand, uno accionado por un variador de velocidad y el otro es accionado por medio de un arranque estrella – triangulo, además alimenta una línea de producción que se encarga de envasar el producto final en diferentes presentaciones, en el gráfico 27 se presentan los datos de placa del transformador del área de latería.

Gráfica 27. Datos de placa Transformador Siemens área de Latería.

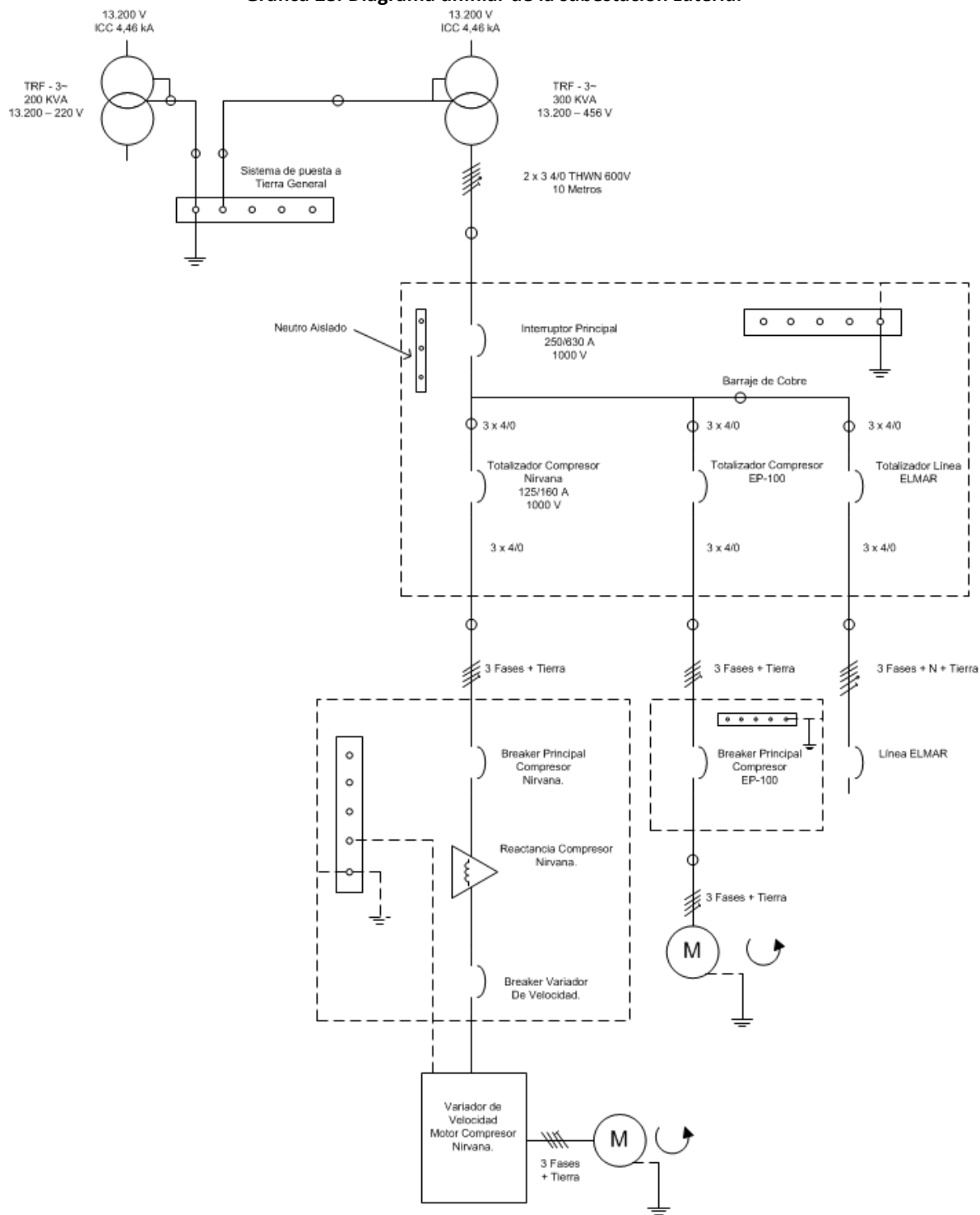
Potencia (kVA)	300	Hz	60
Voltaje primario (V)	13.200	Refrigeración	ONAN
Corriente primario (A)	13,1	N° Fases	3
Tensión de CC (%)	3,82		
Voltaje secundario (V)	456		
Corriente Secundario (A)	379,8		
Conexión	DY5		
Altitud (m)	1000		

SIEMENS

[Elaboración propia]

Con el fin de brindar claridad acerca de la disposición del transformador del área de latería, se presenta en el gráfico 28, un diagrama unifilar en el cual se aprecian las características técnicas de las cargas asociadas a éste. De igual manera se utilizará para referenciar la ubicación del punto de conexión en el cual el equipo de medida será instalado.

Gráfica 28. Diagrama unifilar de la subestación *Latería*.



Como se observa en el diagrama unifilar presentado anteriormente, los dos principales equipos asociados a la subestación Latería son los compresores Ingersoll Rand modelos EP-100 y Nirvana respectivamente cuyas características y regímenes de operación son:

- Un compresor de aire de 100 HP marca Ingersoll Rand modelo EP-100, accionado por medio de un arranque electromecánico de tipo estrella-triángulo. Inicia su puesta en marcha en función de la cantidad de aire comprimido que demanda el sistema neumático de la planta a nivel general.
- Un segundo compresor de aire de 100 HP marca Ingersoll Rand modelo Nirvana, accionado mediante un variador de velocidad, este compresor cumple la función de suministrar el excedente de aire comprimido que no logra suministrar el modelo EP-100. El variador cumple la función de reducir o aumentar la velocidad del motor del compresor Nirvana, en función de la demanda general de aire comprimido, representando de ésta manera un ahorro de energía considerable.

En el gráfico 29 se aprecia el comportamiento de los compresores y la demanda de presión de aire comprimido en la planta, a la fecha correspondiente del día 7 de agosto del 2011, el cual corresponde al período de realización de las mediciones expuestas en el presente trabajo de grado. Estas mediciones fueron tomadas mediante un sensor de presión instalado en la tubería principal a la descarga de los dos compresores. En el **anexo 13.1 Registros de las mediciones realizadas** se expone en detalle el comportamiento de los compresores.

Gráfica 29. Comportamiento de presión en la tubería de descarga.



[Elaboración propia]

Del gráfico 29 se puede ver que los compresores operan a un régimen de presión de 85 PSI, es decir, al llegar a un setpoint preestablecido de presión, mediante lógica programable reduce la velocidad el compresor Nirvana, hasta que la presión llegue a un nivel bajo y entonces empiece a operar el compresor a plena carga, de este modo facilitando el ahorro de energía.

También se identifican diferentes equipos en la subestación Latería pero son de un menor nivel de importancia para el estudio a realizar, estos equipos son:

- Equipos de baja tensión (motores, PLC's, electroválvulas etc.) referenciados a la línea de producción ELMAR y servicios auxiliares (iluminación, equipos de cómputo, acondicionamiento térmico).

8.4. MEDICIONES REALIZADAS

Durante el estudio de niveles de calidad de la potencia se realizó una serie de mediciones eléctricas y térmicas que permitieran determinar el estado de la instalación eléctrica del área de latería, específicamente en el compresor de aire Nirvana.

8.4.1. Mediciones Eléctricas

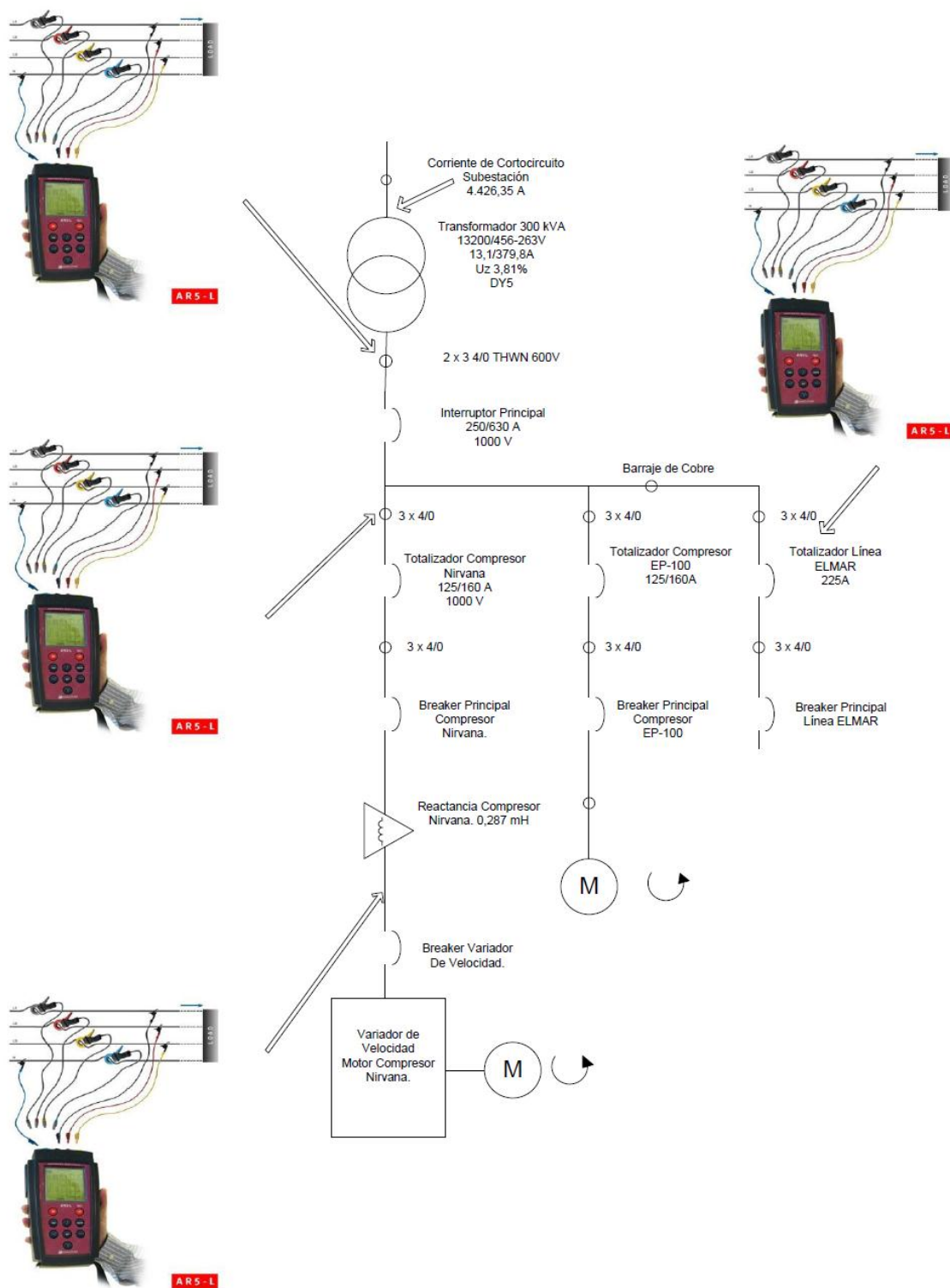
Se tomaron mediciones eléctricas utilizando un analizador de red Círculo AR5-L (En el **anexo 13.2.1** se presenta la hoja técnica de este equipo de medida), en tres diferentes puntos neurálgicos para el sistema de aire comprimido, los cuales son:

1. Variador de velocidad del compresor Nirvana.
2. Transformador Subestación Latería 300 kVA.
3. Protección principal compresor Nirvana.
4. Protección principal línea de producción ELMAR.

Inicialmente se realizaría una medición eléctrica con el analizador de red en el variador de velocidad del compresor Nirvana, sin embargo se realizó prudente verificar los niveles de armónicos en diferentes puntos, puesto que se debe cerciorar cual es el causante de dichos armónicos.

En el gráfico 9.4 presentado a continuación se presenta el diagrama unifilar que presenta en detalle los puntos a ser utilizados para las mediciones.

Gráfica 30. Diagrama unifilar de las mediciones realizadas.



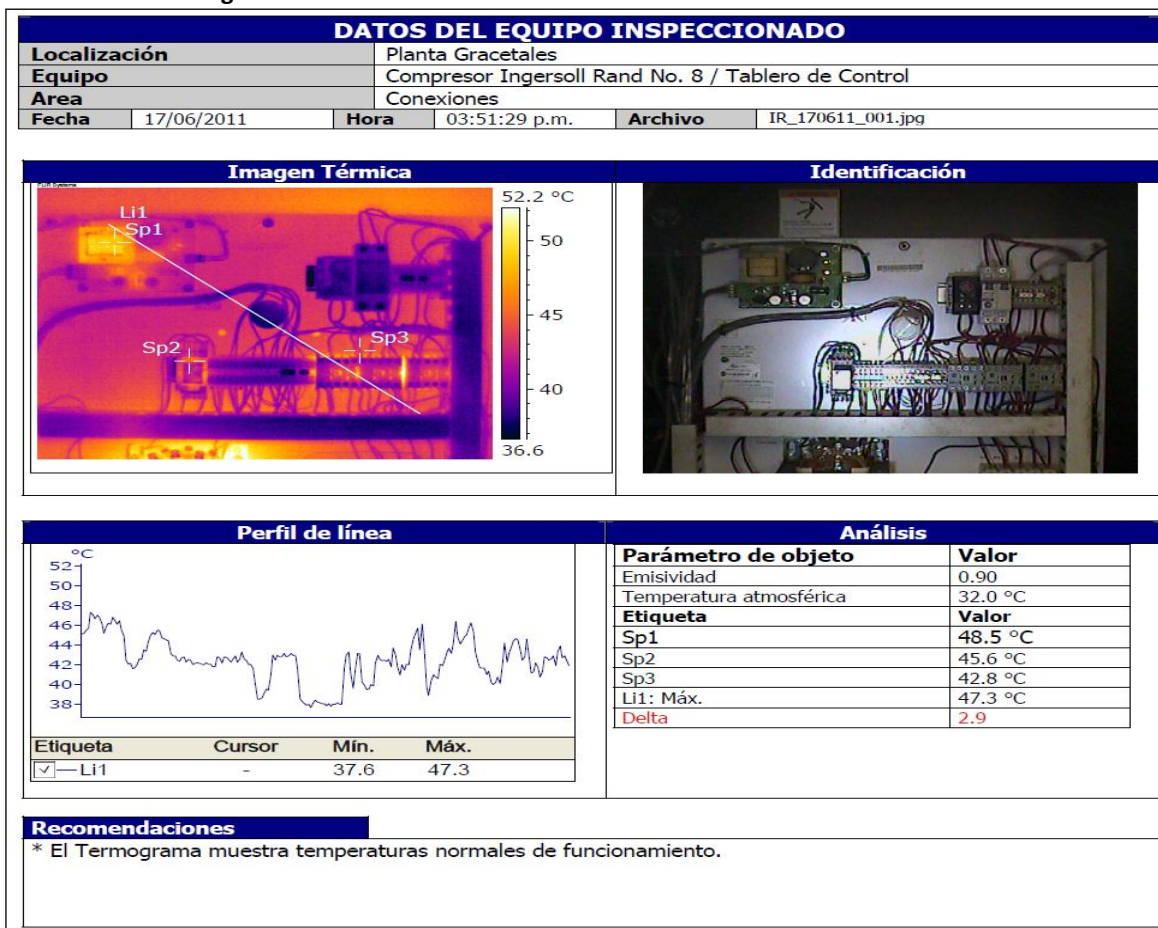
[Elaboración propia]

8.4.2. Mediciones Térmicas

También se realizaron una serie de termografías, con una cámara termo gráfica Fluke Ti-10 (En el **anexo 13.2.2** se presenta la hoja técnica de este equipo de medida), las cuales fueron tomadas con el fin de verificar el estado de los conductores a nivel térmico, y poder identificar posibles armónicos mediante el principio que establece que donde se encuentran armónicos se produce un recalentamiento de los conductores por el llamado “Efecto Piel” [9].

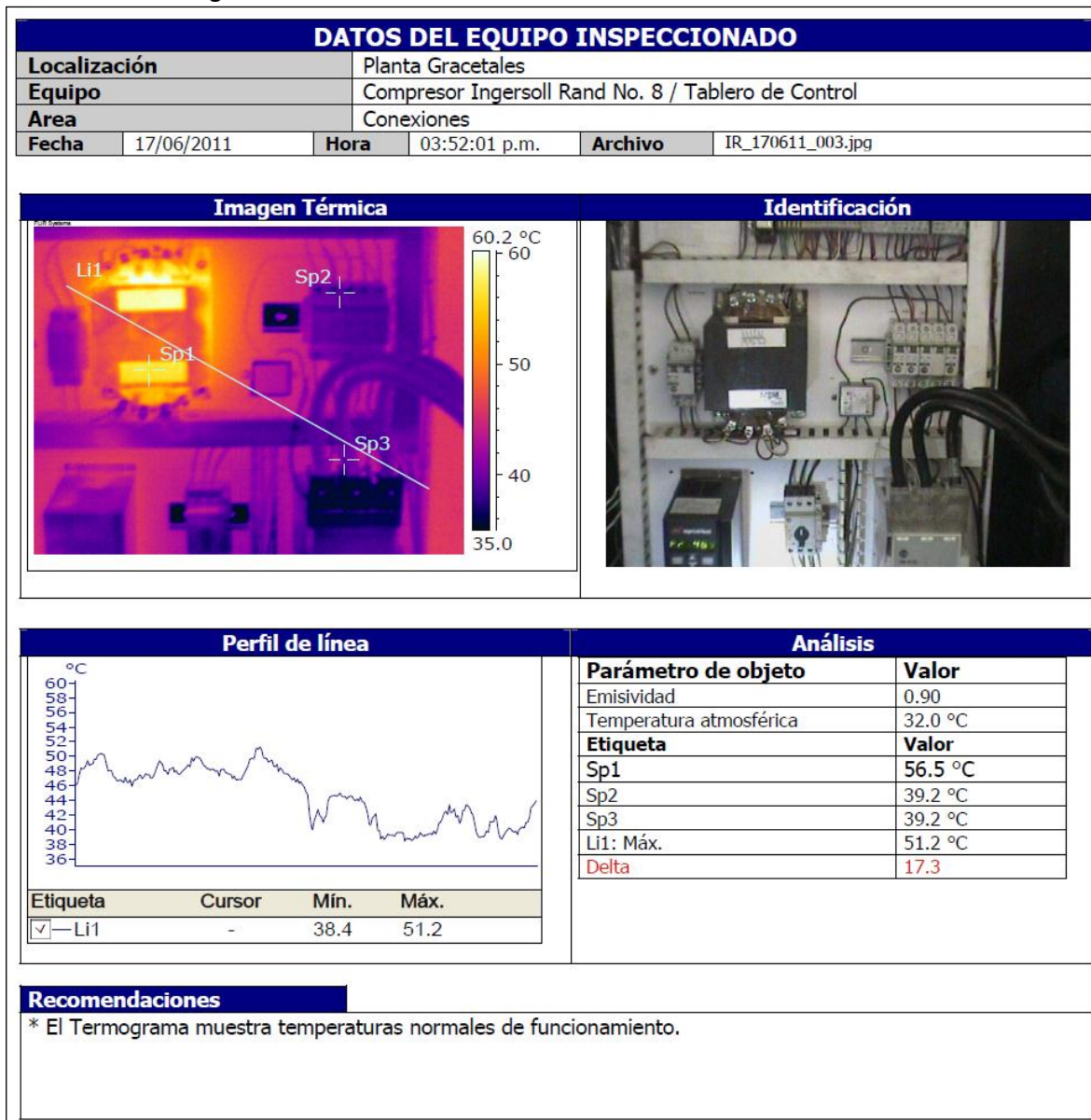
En la ilustración 3 se expone una de las termografías realizadas al compresor Nirvana, en la cual se aprecian los componentes que conforman el tablero de control de compresor, la imagen térmica muestra que el transformador utilizado para deducir la tensión en una tarjeta electrónica tiene una temperatura de 48,5 °C, siendo esto una condición normal de operación para este tipo de elemento.

Ilustración 3. Termografía N°1 tomada en el tablero de conexión.



[Elaboración propia]

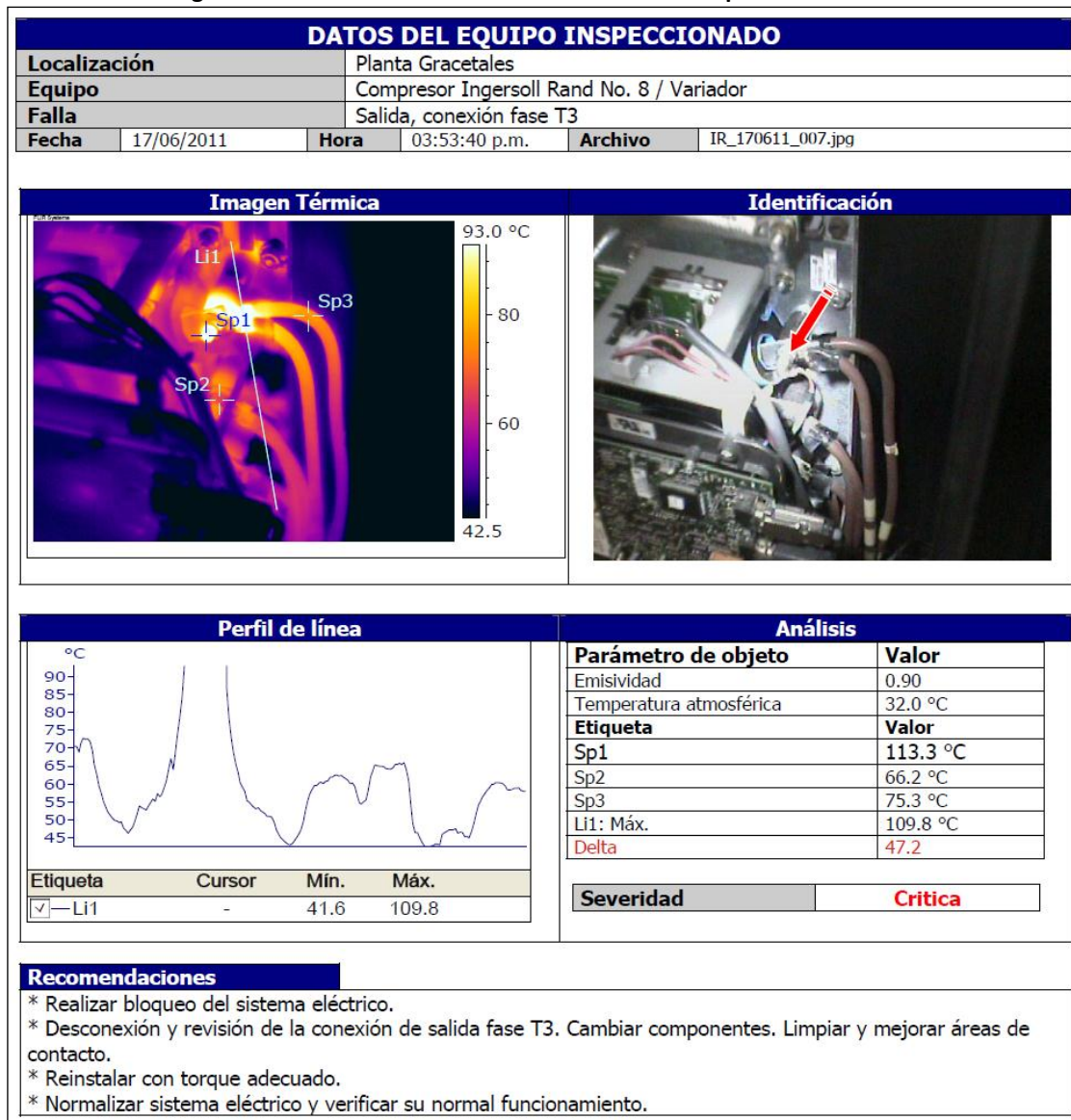
Ilustración 4. Termografía N° 2 tomada en el tablero de conexión.



[Elaboración propia]

En la ilustración 4 se presenta una imagen térmica tomada al transformador de control del compresor Nirvana que es utilizado para reducir la tensión de 440 VAC a 220 VAC y de esta manera darle un nivel de tensión más reducido a los demás componentes, este elemento tiene una temperatura de 56,5 °C que al compararse con otro punto en el mismo recinto arroja un delta de temperatura de 17,3 °C lo cual es un comportamiento normal.

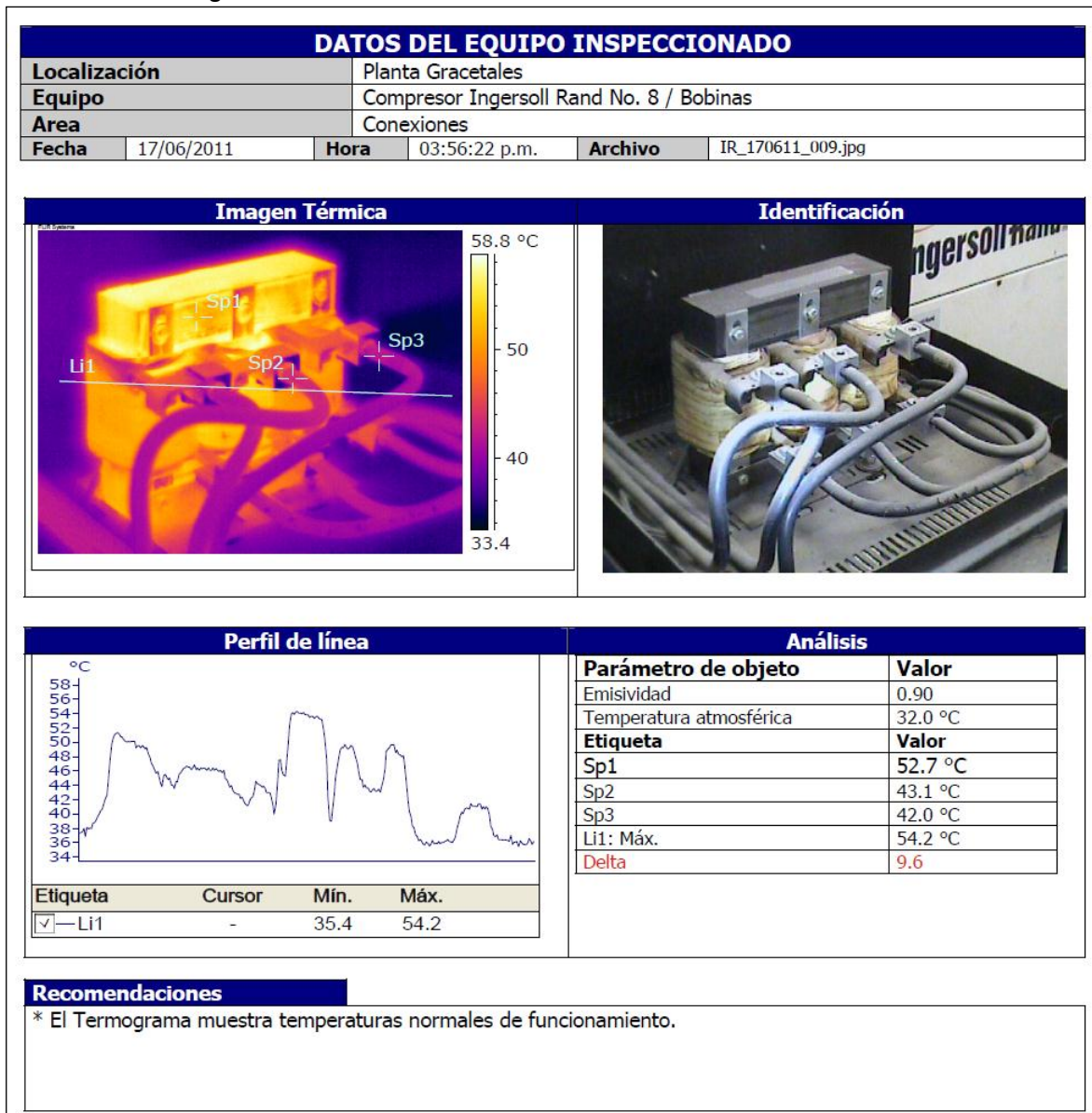
Ilustración 5. Termografía tomada en el variador de velocidad del compresor.



[Elaboración propia]

En la ilustración 5 se aprecia la termografía realizada a los bujes de salida del variador de velocidad del compresor Nirvana, en ella se aprecia que la temperatura que se registra en una de las fases de cable que alimenta el motor del compresor registra una temperatura de 113,3 °C y al momento de comparar esta temperatura con otro punto de la misma área registra un delta de 47,2 °C siendo esto una condición crítica que necesita corregirse de inmediato.

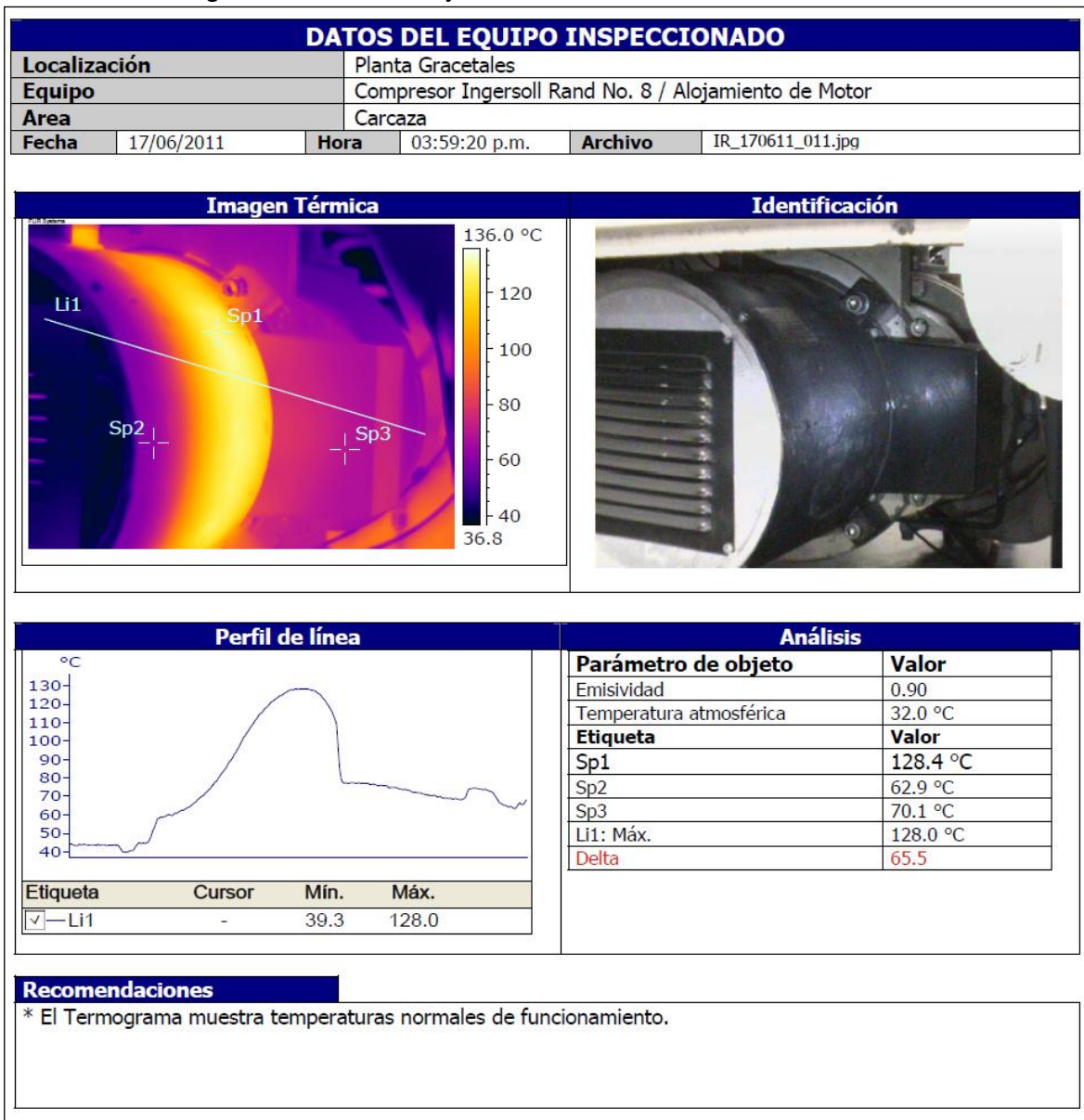
Ilustración 6. Termografía tomada en la Reactancia de Línea.



[Elaboración propia]

En la ilustración 6 se puede apreciar la imagen térmica realizada a la reactancia de línea del compresor nirvana, la cual registra una temperatura de 52,7 ° C y al ser comparada con una temperatura en otro punto arroja un delta de 9,6 ° C, siendo esto una condición normal para este elemento.

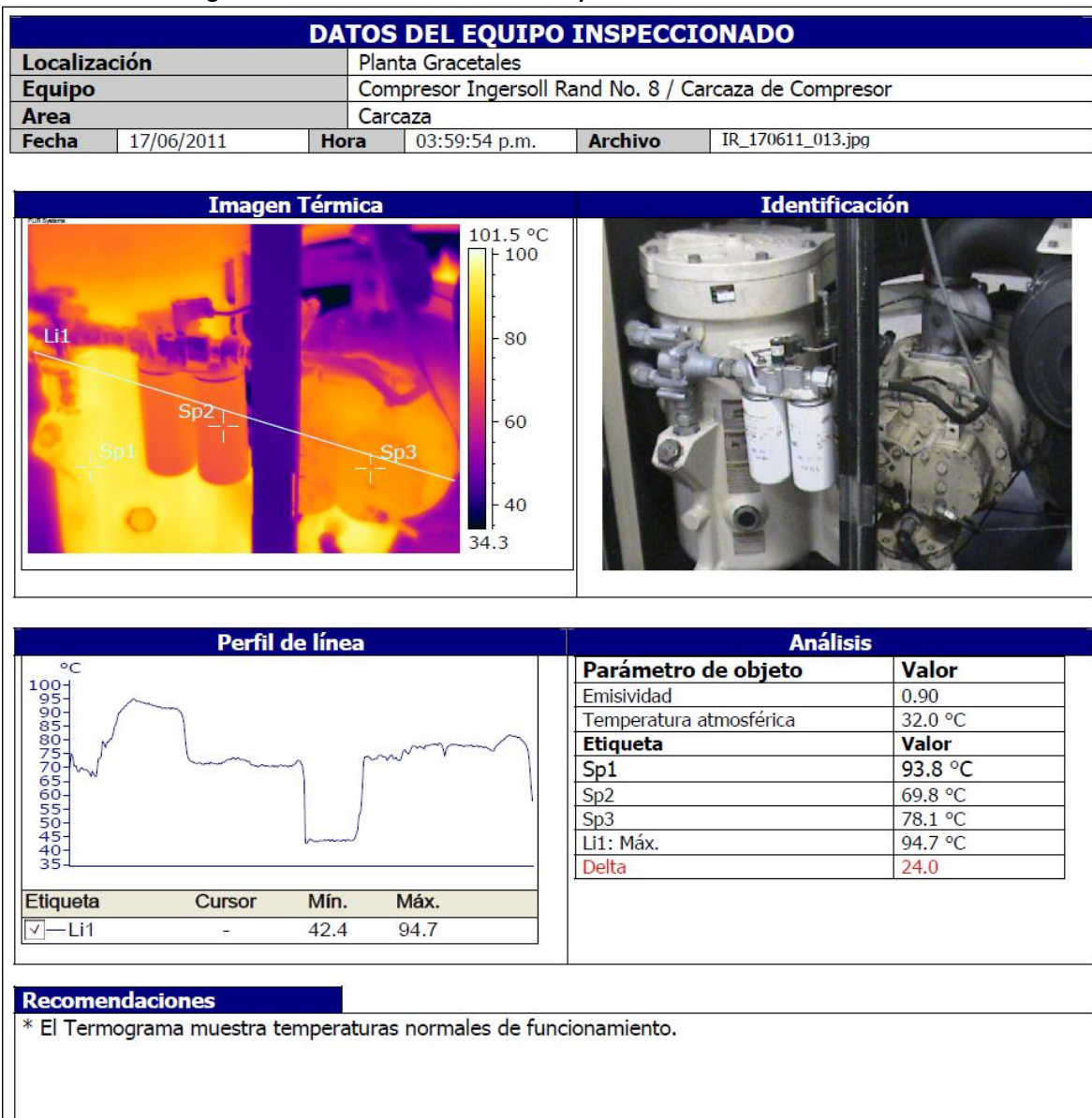
Ilustración 7. Termografía tomada en el Alojamiento del Motor.



[Elaboración propia]

En la ilustración 7 se presenta la imagen térmica del motor principal del compresor nirvana, encontrándose temperaturas del orden de los 128,4 y 70,1 °C, lo que representa una condición normal de funcionamiento.

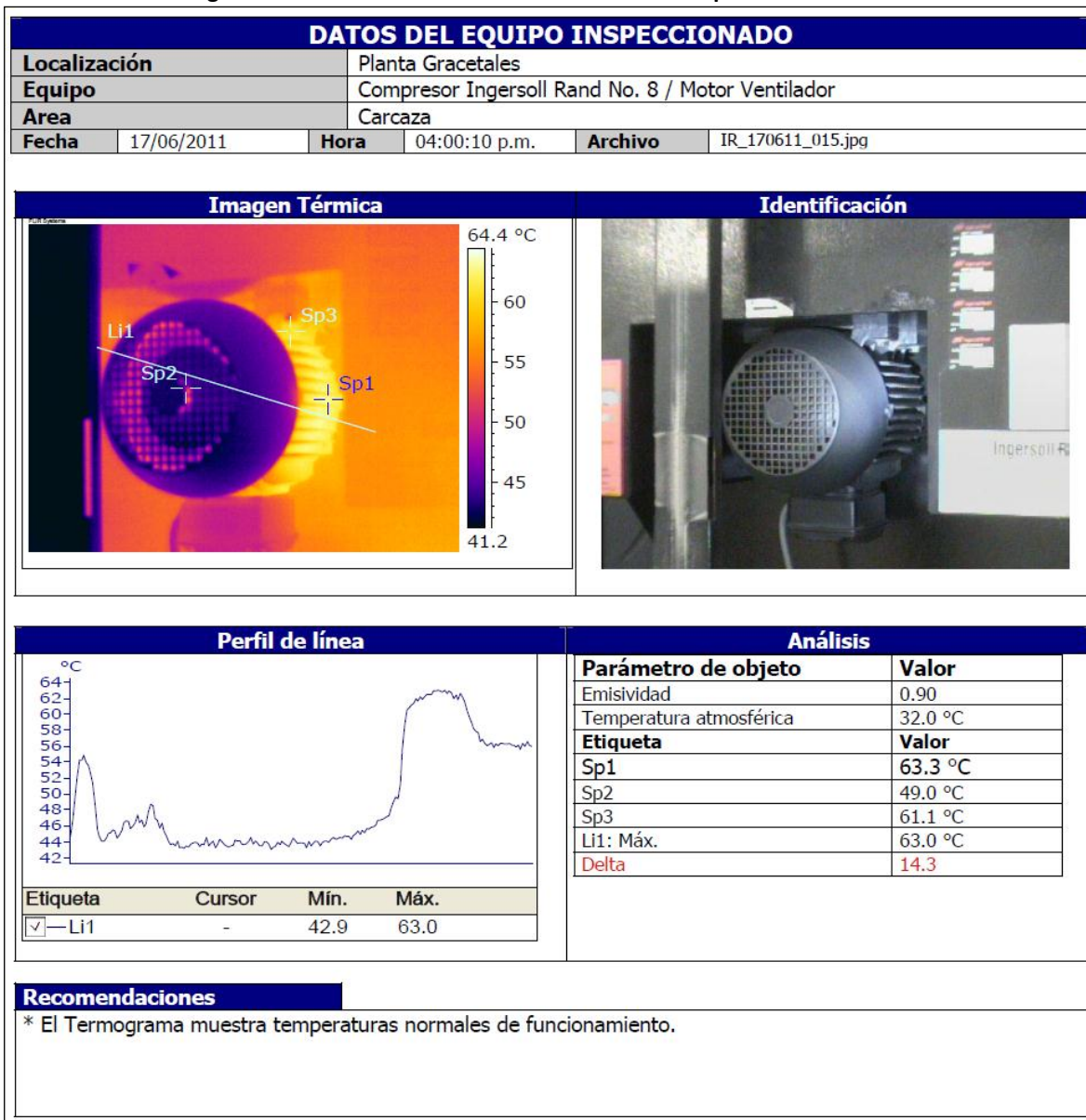
Ilustración 8. Termografía tomada en la carcasa del compresor.



[Elaboración propia]

En la ilustración 8 se presenta la imagen térmica en la que se muestra el compresor de aire y los filtros de aceite de la máquina, en este punto se registraron temperaturas de 93,8 a 78,1 °C y se obtiene un delta de temperatura de 24,0 °C, en los elementos indicados no se muestra anomalía que perturbe su normal funcionamiento

Ilustración 9. Termografía tomada en el motor del ventilador del compresor.



[Elaboración propia]

Igualmente en la ilustración 9 se presenta la termografía realizada al motor de enfriamiento del compresor, registrándose temperaturas de 63,3 a 61,1 °C, siendo esto un comportamiento normal de funcionamiento.

8.5. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN MEDICIONES ELÉCTRICAS

Una vez realizadas las mediciones se procede a recopilarla para el respectivo análisis de niveles de calidad de potencia, así como la posible solución a posibles problemas de calidad de potencia que llegaran a ser registrados. A continuación en los gráficos 9.5 a 9.22 se presentan las mediciones tomadas, en equipos y en líneas de proceso como se había mencionado anteriormente en el gráfico 9.4.

8.5.1. Mediciones Eléctricas en el variador de velocidad del compresor Nirvana

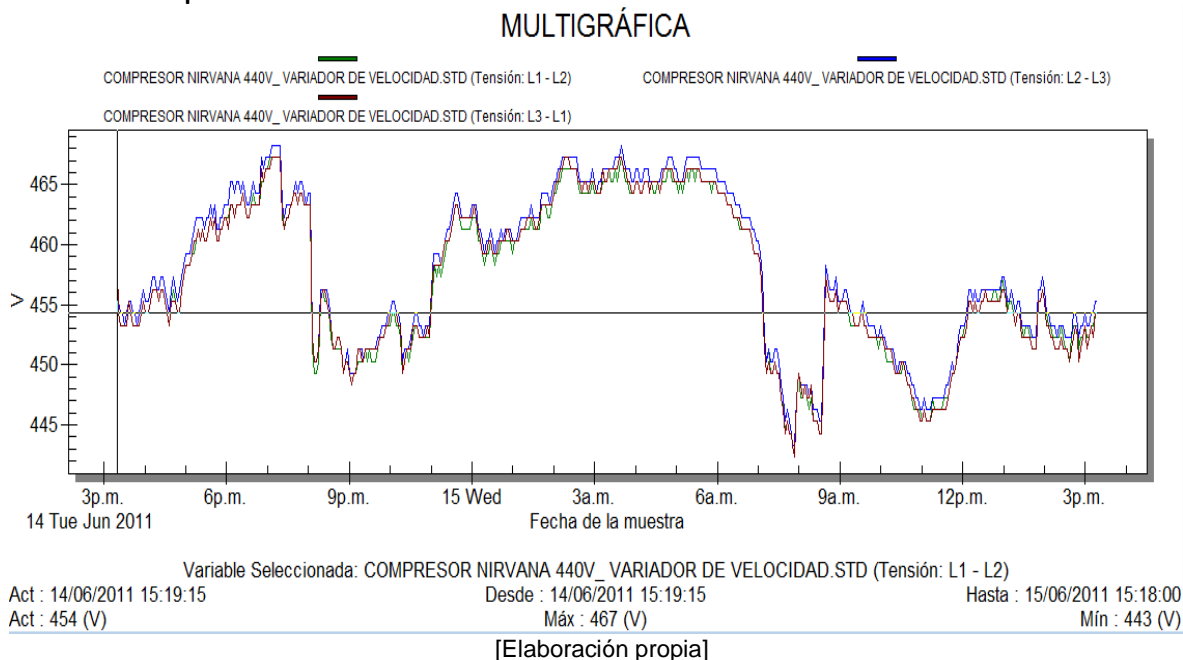
Antes de realizar las mediciones eléctricas en el variador de velocidad del compresor Nirvana, es necesario identificar los datos de placa, que servirán posteriormente a la hora de realizar el estudio de armónicos. Estos datos se exponen en la tabla 6.

Tabla 6. Datos de placa Variador de Velocidad Ingersoll Rand.

Variador de velocidad fabricado por INGERSOLL RAND	
Entrada	
Número de fases	3
Tensión (V)	380-480
Frecuencia (Hz)	50 – 60
Corriente (A)	180-157
Potencia aparente kVA	125
Salida	
Número de fases	3
Tensión	460
Frecuencia	50 - 60
Corriente	190
Parte Número	CCN22156798
TIPO	MD120TIR

[Elaboración propia]

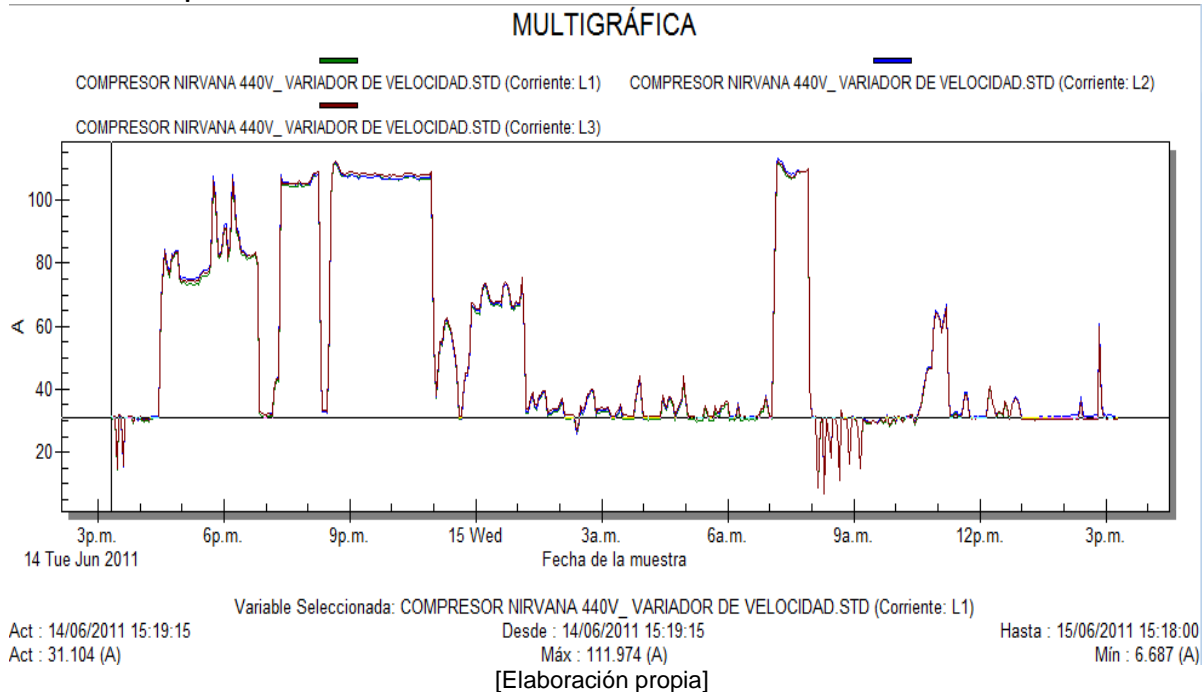
Gráfica 31. Comportamiento del nivel de tensión en el variador de velocidad.



En el gráfico 31 se expone el comportamiento de la tensión entre cada una de las fases durante la medición realizada al variador de velocidad del compresor Nirvana, en ella se puede apreciar que la tensión entre L1-L2 (verde), L2-L3 (azul) L3-L1 (rojo) estuvieron en promedio 456,77 V, 457,65 V y 456,85 V. Durante la medición se registraron valores máximos de 467 V, 468 V, y 467 V, además se registraron valores mínimos de 443 V, 442 V y 443 V.

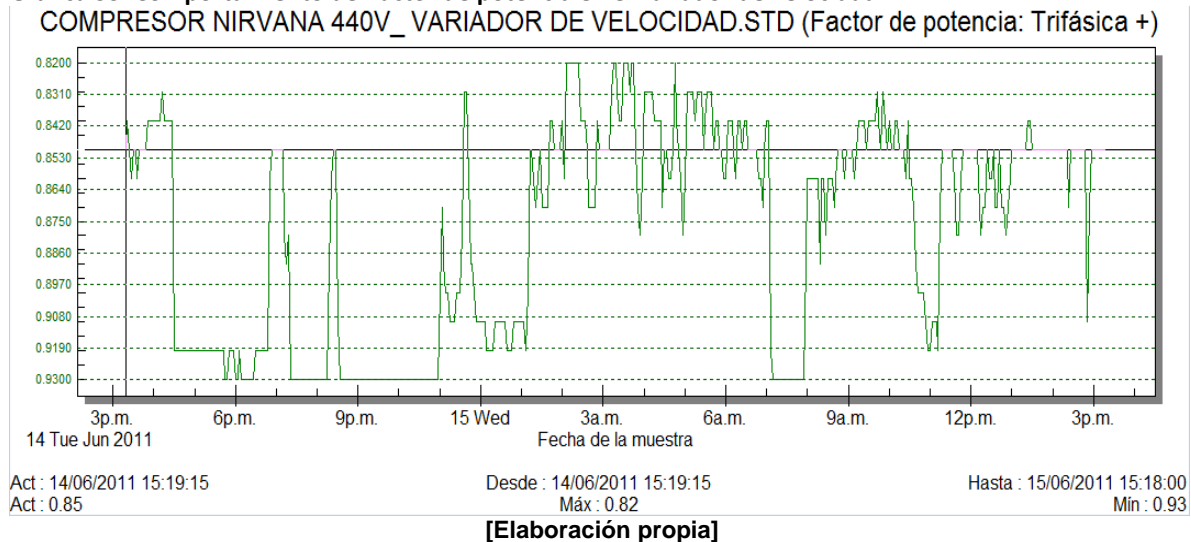
La corriente demandada por el variador de velocidad ilustrada en el gráfico 32 tuvo un comportamiento promedio en las Líneas L1 (verde), L2 (azul) y L3 (rojo) de 52,90 A, 53,49 A y 53,52 A respectivamente. Las máximas corrientes registradas en las líneas L1, L2, y L3 fueron de 111,97 A, 113,44 A y 112,58 A. La corriente nominal del variador de velocidad es de 157 A, por lo tanto el factor de carga al que está sometido el equipo tuvo un comportamiento mínimo de 4,27%, un promedio de 33,96% y su máximo factor de carga fue de 71,73%, a lo que se llega que el variador de velocidad trabaja en un régimen de carga recomendado. *“Es de reseñar que los compresores Nirvana logran una presión constante y una eficiencia máxima en todo su rango de funcionamiento, desde plena carga al 100% hasta un valor tan bajo como el de 25% de carga”.* [16]

Gráfica 32. Comportamiento de la corriente en el variador de velocidad.



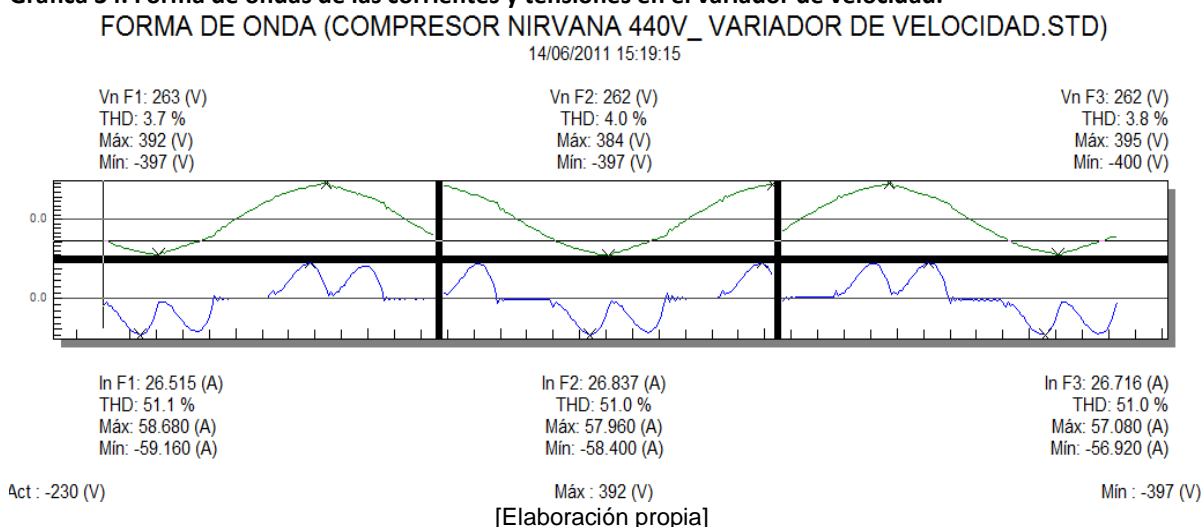
En el gráfico 33 se observa el comportamiento del factor de potencia trifásico en el variador de velocidad, este tuvo un comportamiento promedio de 0,87 P.U., un mínimo de 0,82 P.U. y un máximo de 0,93 P.U.

Gráfica 33. Comportamiento del factor de potencia en el variador de velocidad.



Como se observa en el gráfico 34 el contenido armónico presente en el variador de velocidad del compresor Nirvana está haciendo que la onda en corriente se distorsione, esto es un indicio que el área de latería se está viendo afectada por armónicos en la red, y que algún equipo asociado a dicha área los está generando. En las ondas de tensión presentadas en el gráfico 9.8 se presenta que la distorsión es menor, esto sucede porque los armónicos impactan en menor magnitud esta señal debido a la impedancia del sistema.

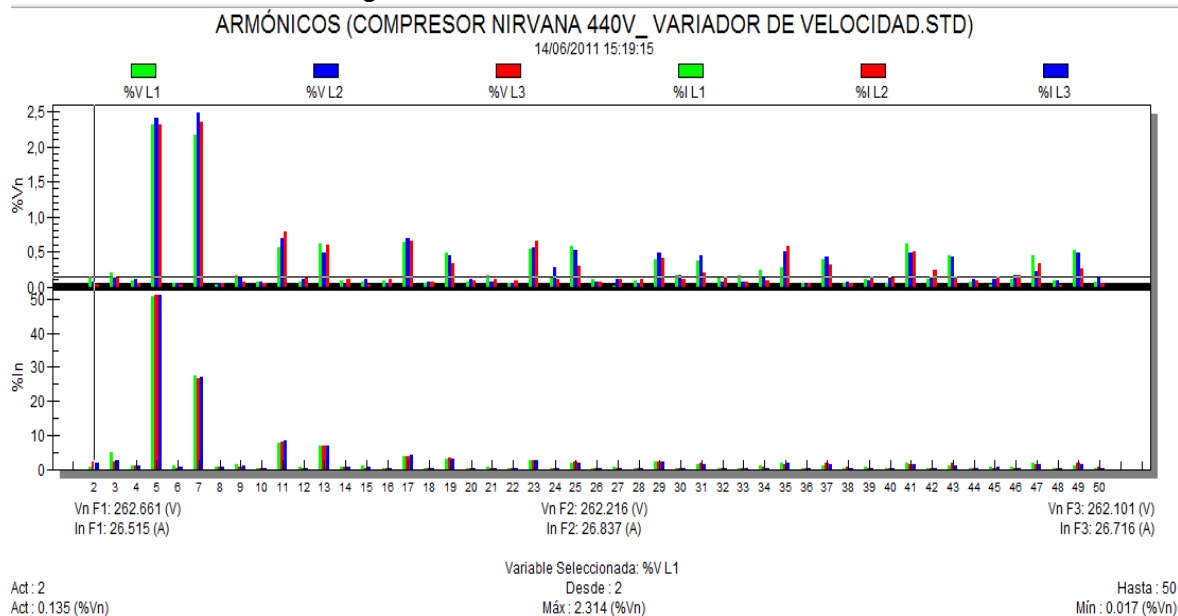
Gráfica 34. Forma de ondas de las corrientes y tensiones en el variador de velocidad.



En el gráfico 35 se aprecia que el armónico 5 en corriente tiene una magnitud promedio de 42,82%, el armónico 7 en corriente un promedio de 20,23%, el armónico 11 en corriente un promedio de 7,89% y el armónico 13 en corriente un promedio de 5,48%.

En la misma gráfica se manifiesta que el armónico 5 en tensión tiene una magnitud promedio de 3,1%, el armónico 7 en tensión un promedio de 2,4%, el armónico 11 en tensión un promedio de 1,3% y el armónico 13 en tensión tiene una magnitud promedio de 1,0%. Se destaca en lo anterior que estos niveles de armónicos son normales en la operación de los variadores de velocidad convencionales.

Gráfica 35. Promedios de las magnitudes armónicas en el variador de velocidad.

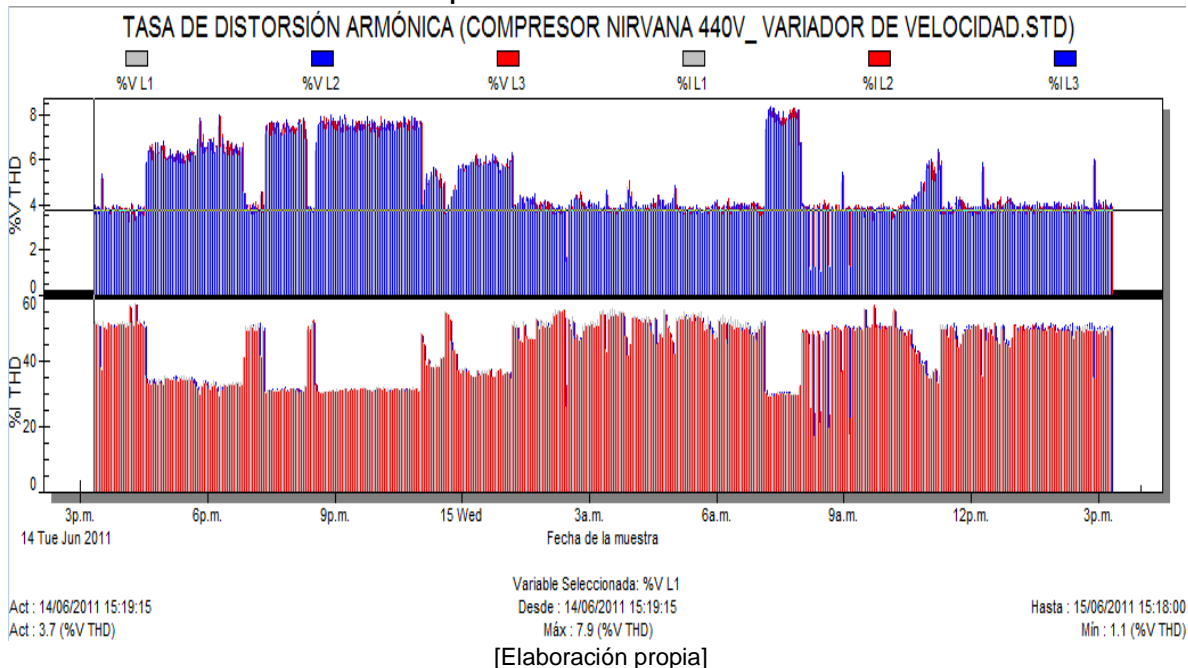


[Elaboración propia]

En el gráfico 36 se presenta en la parte superior el comportamiento del THD en tensión durante la medición, en promedio las magnitudes del THD en las líneas L1, L2, y L3 tuvieron un comportamiento de 4,78%, 5,01% y 4,96% respectivamente, y los máximos valores alcanzados en la medición fueron 7,9%, 8,3% y 8,4%.

El THD en corriente presentado en la parte inferior del gráfico 36 muestra que las línea L1, L2, y L3 tuvieron un comportamiento promedio de 43,60%, 43,05% y 43,06%, haciendo notable un alto porcentaje de distorsión en las señales de corriente, en cuanto los valores máximos registrados en las líneas L1, L2, y L3 están 57,4%, 57,01% y 57,0%.

Gráfica 36. Tasa de distorsión armónica presente en el variador de velocidad

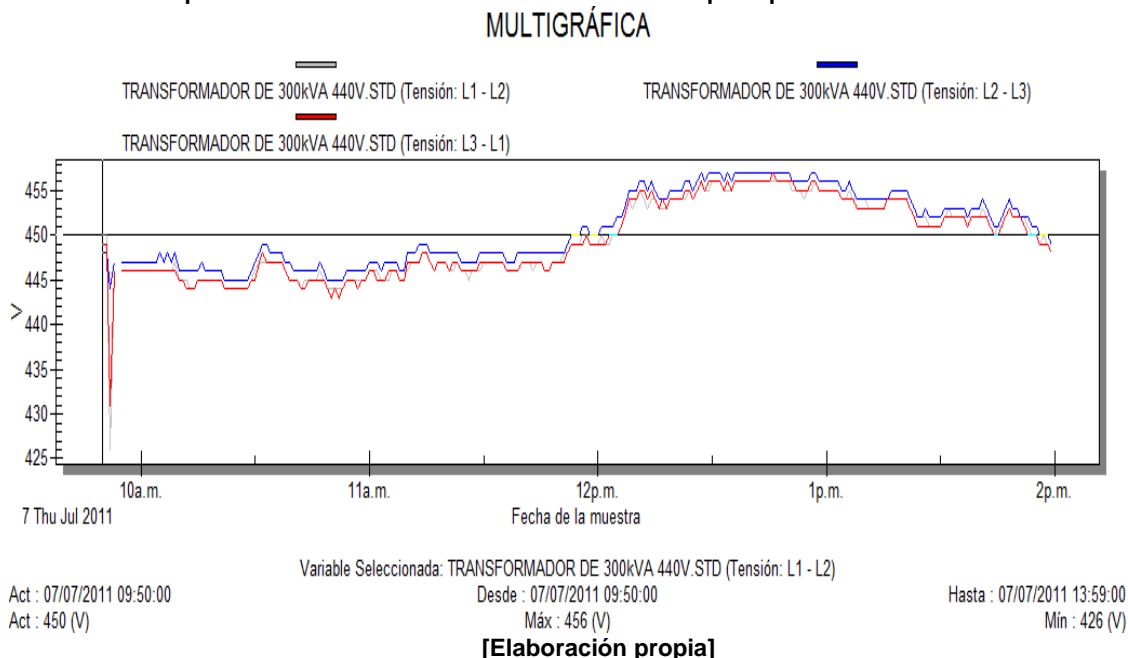


8.5.2. Mediciones Eléctricas en el Transformador principal del área de Latería

Las mediciones en el transformador principal del área de latería fueron realizadas en el secundario del equipo y empezaron el día 7 de julio de 2011 desde las 9:52 A.M hasta las 2:00 P.M del mismo día, a continuación se exponen los resultados de dicha medida.

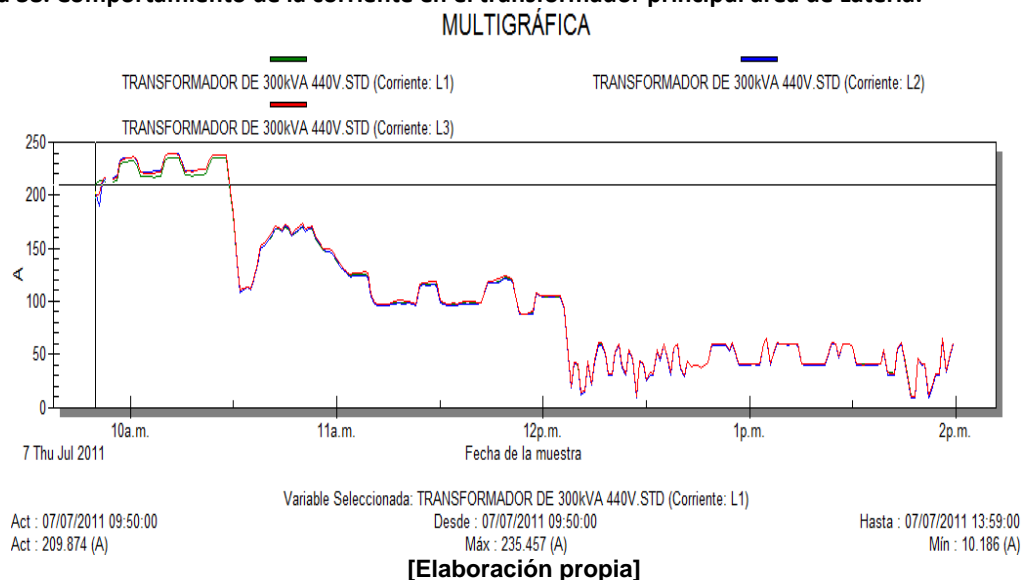
En el gráfico 37 se ilustra el comportamiento de la tensión entre cada una de las fases durante la medición realizada al transformador principal que alimenta el área de Latería, en ella se puede apreciar que la tensión entre L1-L2 (gris claro), L2-L3 (azul) Y L3-L1 (rojo) estuvieron en promedio 449,48 V, 450,63 V y 449,47 V. Durante la medición se registraron valores máximos de 456 V, 457 V, y 457,03 V, además se registraron valores mínimos de 426 V, 444 V y 431 V.

Gráfica 37. Comportamiento de la tensión en el transformador principal en el área de Latería.



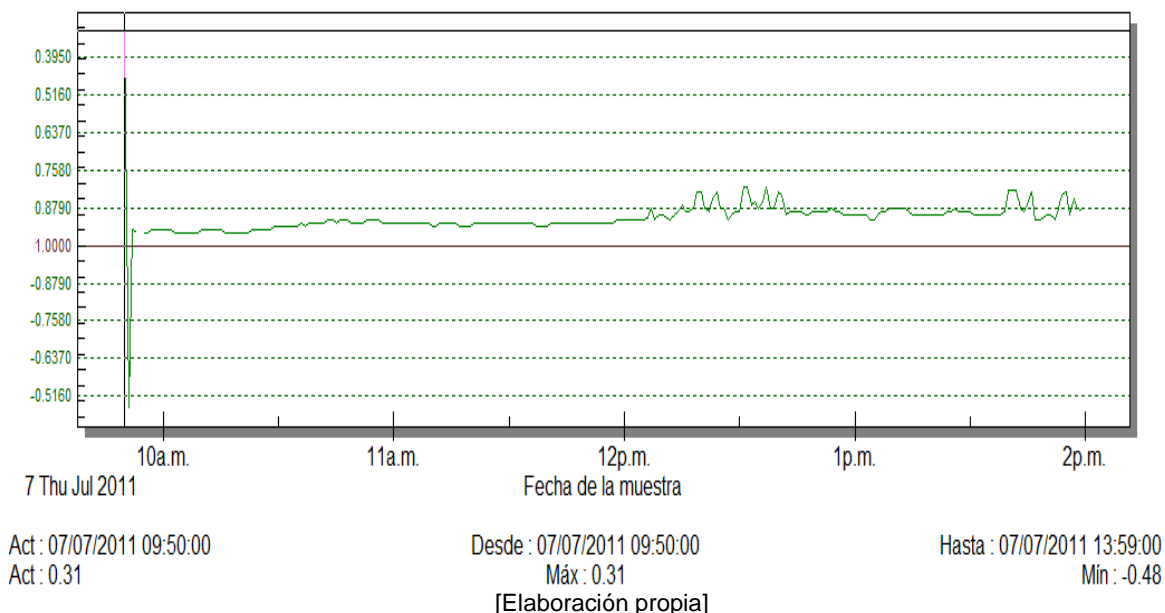
La corriente entregada por el transformador ilustrada en el gráfico 38 tuvo un comportamiento promedio en las Líneas L1 (verde oscuro), L2 (azul) y L3 (rojo) de 101,07 A, 101,12 A y 102,33 A respectivamente. Las máximas corrientes registradas en las líneas L1, L2, y L3 fueron de 235,47 A, 238,92 A y 239,23 A.

Gráfica 38. Comportamiento de la corriente en el transformador principal área de Latería.



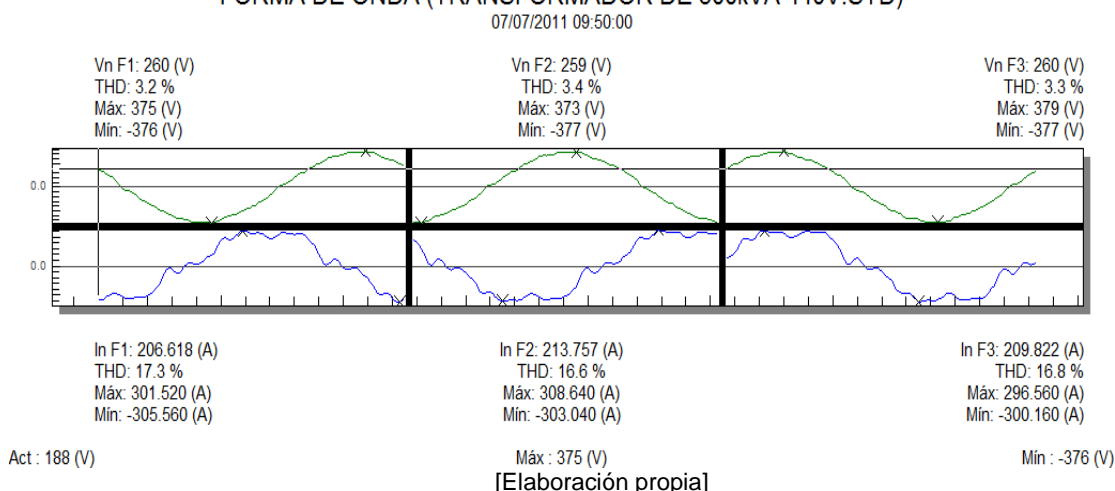
En el gráfico 39 se observa el comportamiento del factor de potencia trifásico en el transformador principal que alimenta el área de Latería, este tuvo un comportamiento promedio de 0,91 P.U., un mínimo de 0,81 P.U. y un máximo de 0,96 P.U.

Gráfica 39. Comportamiento del factor de potencia en el transformador principal en el área de Latería.
TRANSFORMADOR DE 300kVA 440V.STD (Factor de potencia: Trifásica +)



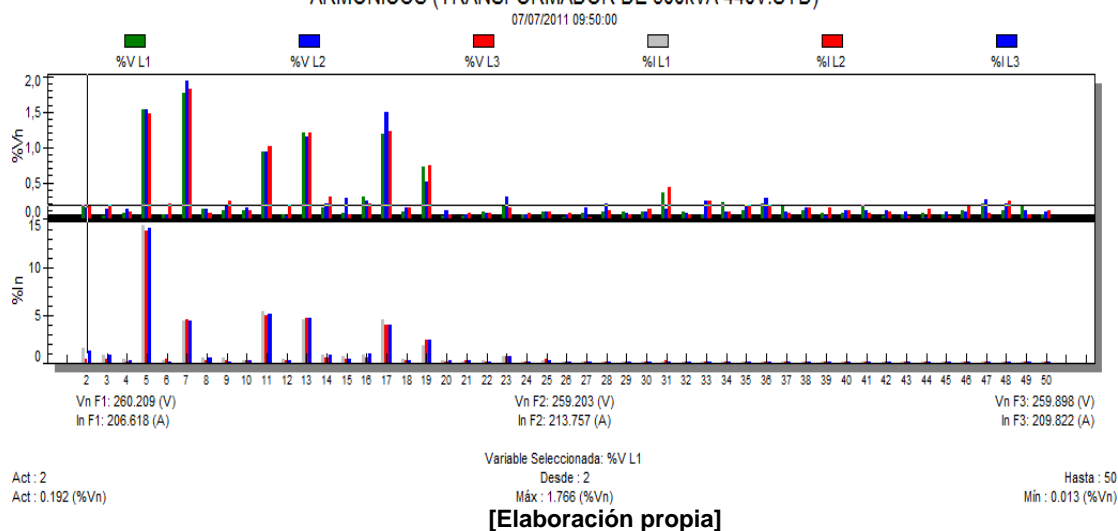
Como se aprecia en la parte inferior del gráfico 40 el contenido armónico presente en el transformador principal que alimenta el área de Latería está haciendo que la onda en corriente se distorsione en menor magnitud que en la medición realizada en el variador de velocidad, esto es un indicio que los armónicos los está generado el variador de velocidad expuesto anteriormente y que dichos armónicos se evidencian reflejados el secundario del transformador de Latería. En las ondas de tensión presentadas en la parte superior del gráfico 9.14 se expone que la distorsión es menor, esto sucede porque los armónicos impactan en menor magnitud esta señal debido a la impedancia del sistema.

Gráfica 40. Forma de ondas de corrientes y tensiones en el transformador principal área de Latería.
FORMA DE ONDA (TRANSFORMADOR DE 300kVA 440V.STD)



En la parte inferior del gráfico 41 se aprecia que el armónico 5 en corriente tiene una magnitud promedio de 21,49%, el armónico 7 en corriente un promedio de 7,28%, el armónico 11 en corriente un promedio de 4,79% y el armónico 13 en corriente un promedio de 3,18%. En la misma gráfica pero en la parte superior se manifiesta que el armónico 5 en tensión tiene una magnitud promedio de 1,18%, el armónico 7 en tensión un promedio de 1,67%, el armónico 11 en tensión un promedio de 0,42% y el armónico 13 en tensión tiene una magnitud promedio de 0,38%.

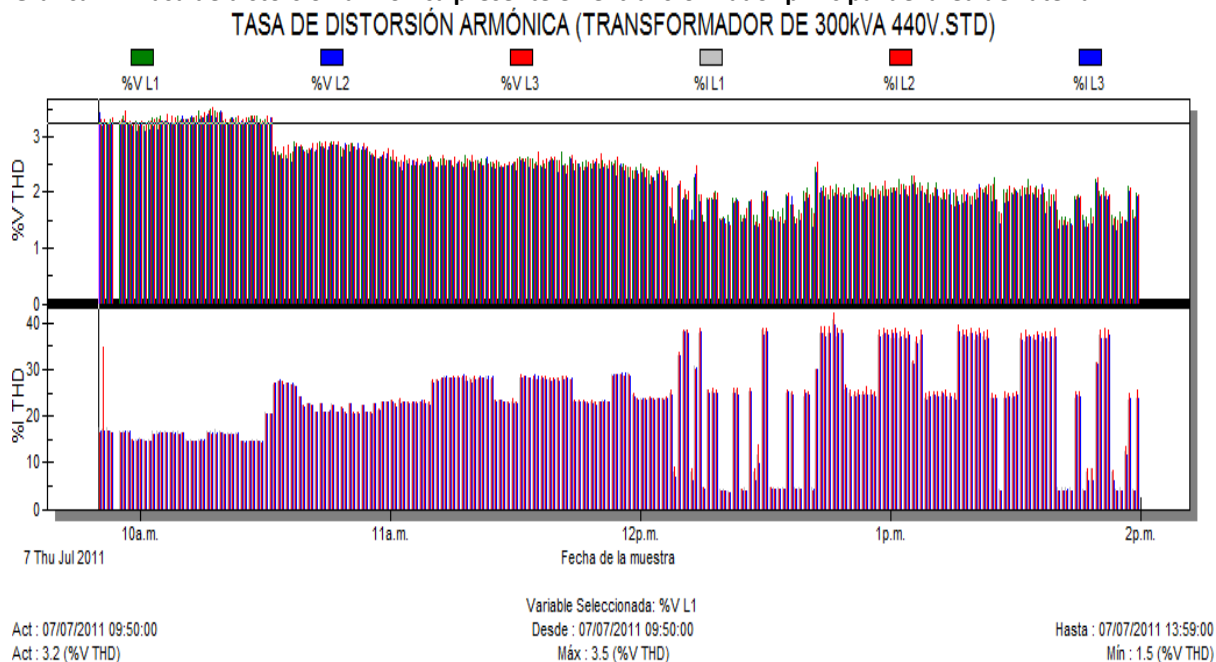
Gráfica 41. Promedios de magnitudes armónicas en el transformador principal del área de Latería.
ARMÓNICOS (TRANSFORMADOR DE 300kVA 440V.STD)



En el gráfico 42 se ilustra en la parte superior el comportamiento del THD en tensión durante la medición, en promedio las magnitudes del THD en las líneas L1, L2, y L3 tuvieron un comportamiento de 2,39%, 2,30% y 2,40% respectivamente, y los máximos valores alcanzados en la medición fueron 3,5%, 3,6% y 3,5%.

El THD en corriente expuesto en la parte inferior del gráfico 42 muestra que las líneas L1, L2, y L3 tuvieron un comportamiento promedio de 23,27%, 23,59% y 23,08%, haciendo notable un alto porcentaje de distorsión en las señales de corriente, en cuanto los valores máximos registrados en las líneas L1, L2, y L3 están 40,6%, 42,1% y 39,5%.

Gráfica 42. Tasa de distorsión armónica presente en el transformador principal del área de Latería.



[Elaboración propia]

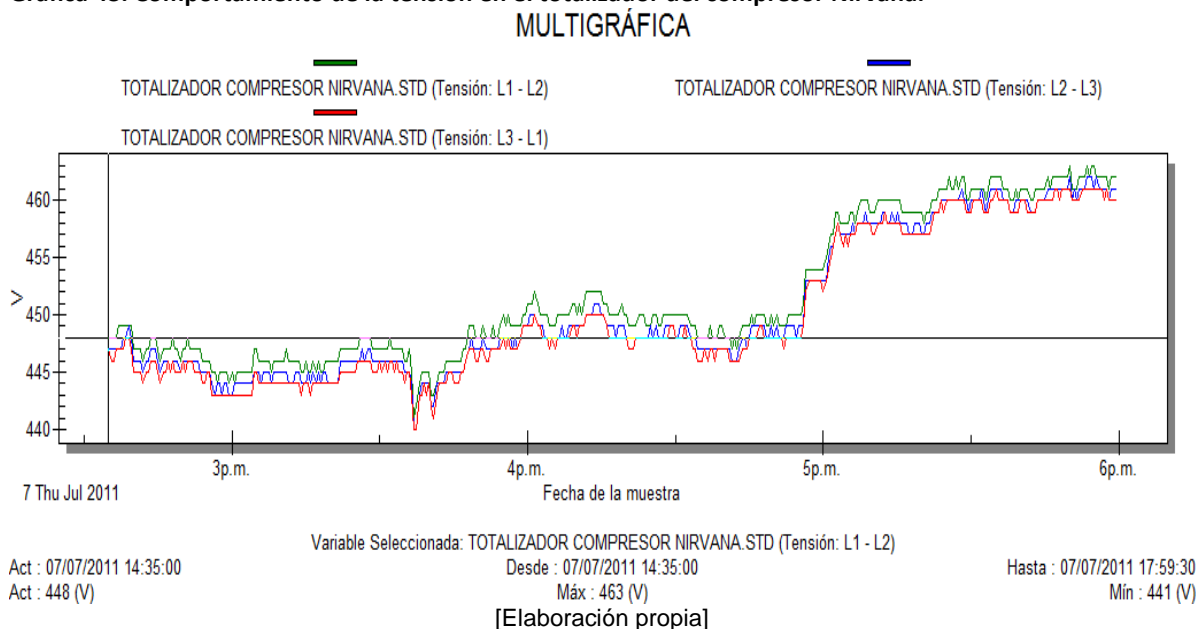
8.5.3. Mediciones Eléctricas en el totalizador del compresor Nirvana

Las mediciones en el breaker principal que protege el compresor Nirvana y el cable alimentador fueron realizadas el día 7 de julio de 2011 desde las 03:35 P.M

hasta las 6:00 P.M del mismo día, a continuación se presentan los resultados de dicha medida.

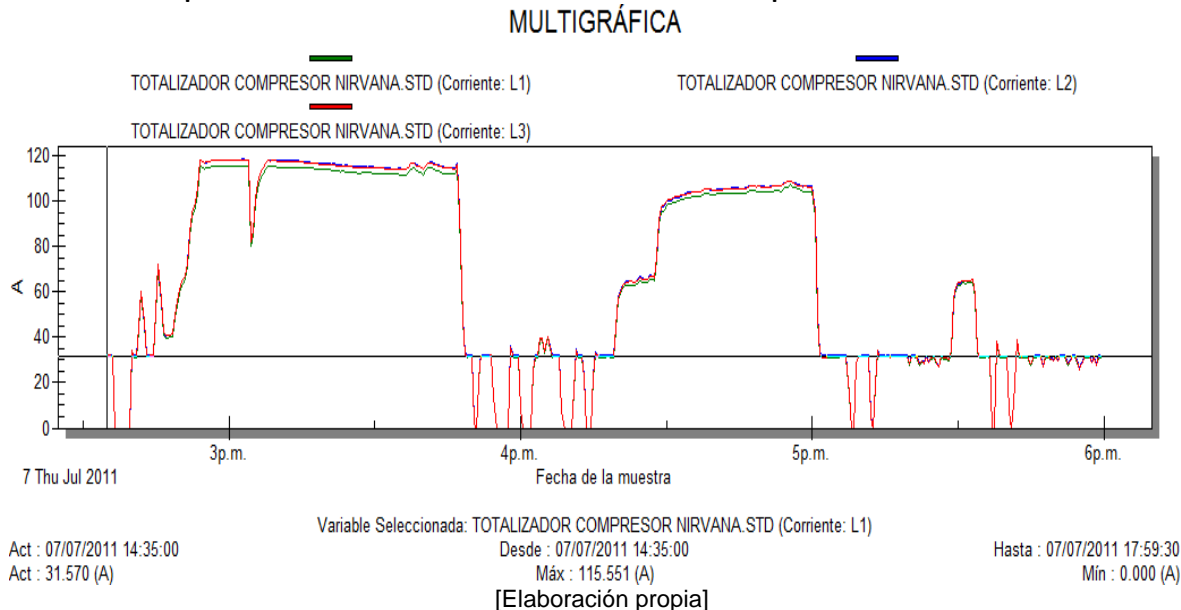
En el gráfico 43. Se presenta el comportamiento de la tensión entre cada una de las fases durante la medición realizada a la protección principal del compresor Nirvana, en ella se puede apreciar que la tensión entre L1-L2 (verde oscuro), L2-L3 (azul) Y L3-L1 (rojo) estuvieron en promedio 451,52 V, 450,35 V y 449,86 V. Durante la medición se registraron valores máximos de 463 V, 462 V, y 461 V, además se registraron valores mínimos de 441 V, 440 V y 440 V.

Gráfica 43. Comportamiento de la tensión en el totalizador del compresor Nirvana.



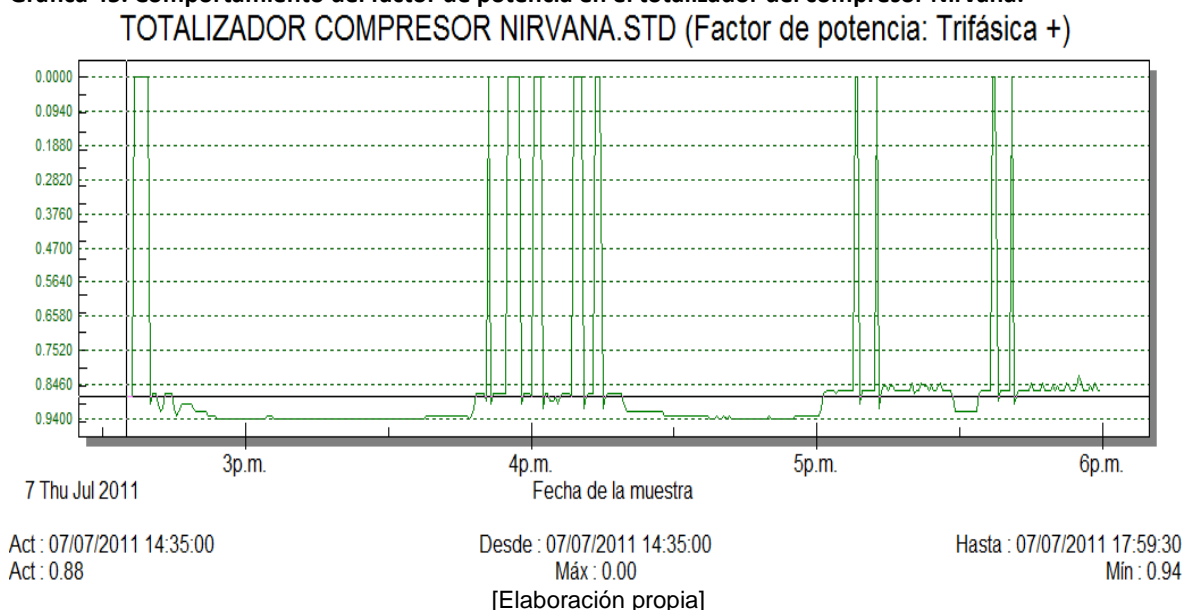
La corriente expuesta en el gráfico 44 tuvo un comportamiento promedio en las Líneas L1 (verde oscuro), L2 (azul) y L3 (rojo) de 71,51 A, 71,17 A y 72,90 A respectivamente. Las máximas corrientes registradas en las líneas L1, L2, y L3 fueron de 115,55 A, 118,41 A y 118,18 A.

Gráfica 44. Comportamiento de la corriente en el totalizador del compresor Nirvana.



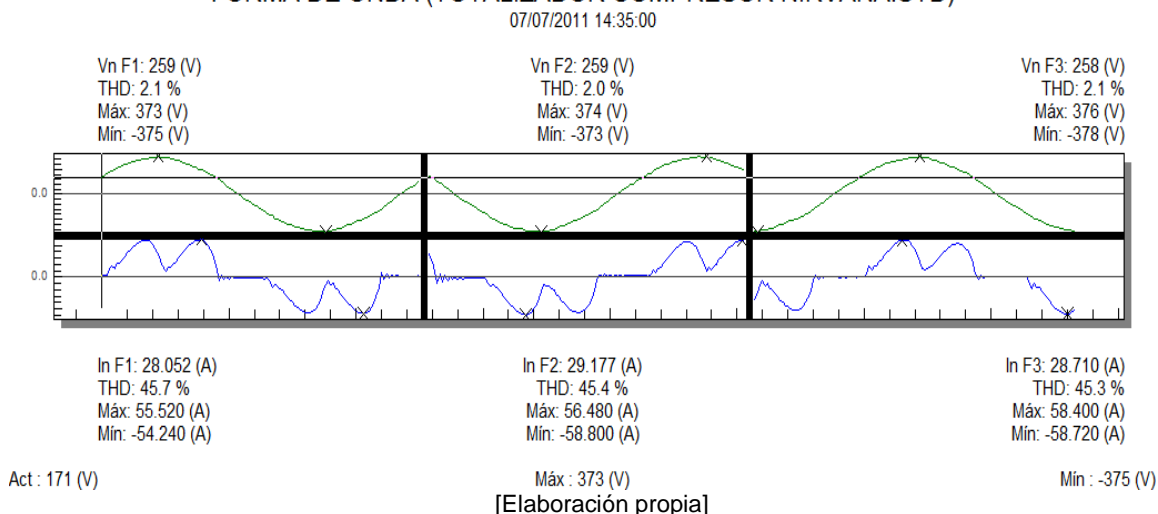
En el gráfico 45 se observa el comportamiento del factor de potencia trifásico en la medición que se realizó en el totalizador del compresor Nirvana, este tuvo un comportamiento promedio de 0,90 P.U., un mínimo de 0,82 P.U. y un máximo de 0,94 P.U.

Gráfica 45. Comportamiento del factor de potencia en el totalizador del compresor Nirvana.



Como se observa en la parte inferior del gráfico 46 el contenido armónico presente en el totalizador del compresor Nirvana está haciendo que la onda en corriente se distorsione en menor porcentaje que en la medición realizada en el variador de velocidad, esto es un indicio que la reactancia de línea está haciendo su trabajo, pero los armónicos generados por el variadores son tan elevados que la reactancia no es capaz de mitigar la totalidad de armónicos generados. En las ondas de tensión presentadas en la parte superior del gráfico 9.20 se muestra que la distorsión es menor, esto sucede porque los armónicos impactan en menor magnitud esta señal debido a la impedancia del sistema.

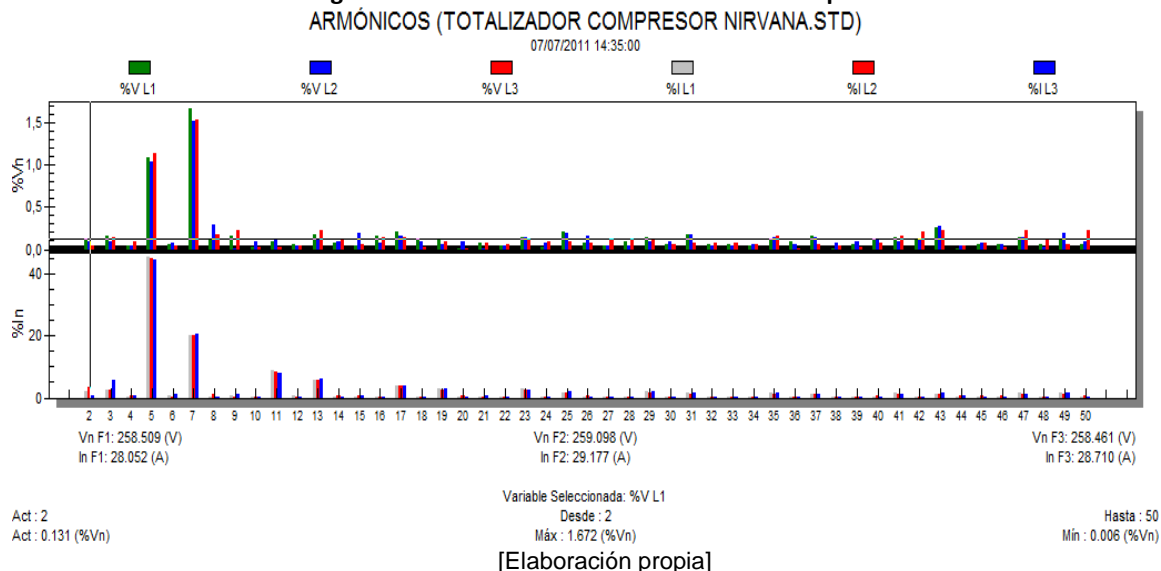
Gráfica 46. Forma de ondas de las corrientes y tensiones en el totalizador del compresor Nirvana.
FORMA DE ONDA (TOTALIZADOR COMPRESOR NIRVANA.STD)



En la parte inferior del gráfico 47 Se aprecia que el armónico 5 en corriente tiene una magnitud promedio de 33,26%, el armónico 7 en corriente un promedio de 12,81%, el armónico 11 en corriente un promedio de 7,35% y el armónico 13 en corriente un promedio de 4,41%.

En la misma gráfica pero en la parte superior se manifiesta que el armónico 5 en tensión tiene una magnitud promedio de 1,24%, el armónico 7 en tensión un promedio de 1,58%, el armónico 11 en tensión un promedio de 0,43% y el armónico 13 en tensión tiene una magnitud promedio de 0,35%.

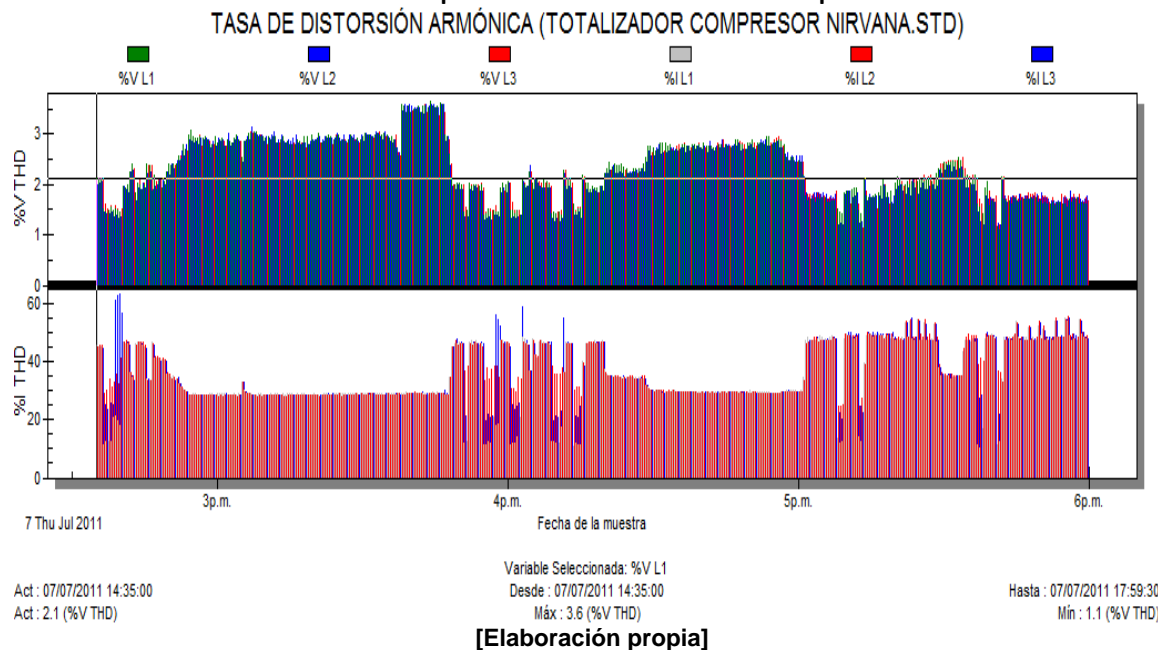
Gráfica 47. Promedios de magnitudes armónicas en el totalizador del compresor Nirvana.



En el gráfico 48 presenta en la parte superior el comportamiento del THD en tensión durante la medición, en promedio las magnitudes del THD en las líneas L1, L2, y L3 tuvieron un comportamiento de 2,41%, 2,37% y 2,37% respectivamente, y los máximos valores alcanzados en la medición fueron 3,6%, 3,6% y 3,6%.

El THD en corriente presentado en la parte inferior del gráfico 48 muestra que las líneas L1, L2, y L3 tuvieron un comportamiento promedio de 36,94%, 37,23% y 37,15%, haciendo notable un alto porcentaje de distorsión en las señales de corriente, en cuanto los valores máximos registrados en las líneas L1, L2, y L3 están 55,3%, 55,5% y 56,9%.

Gráfica 48. Tasa de distorsión armónica presente en el totalizador del compresor Nirvana.

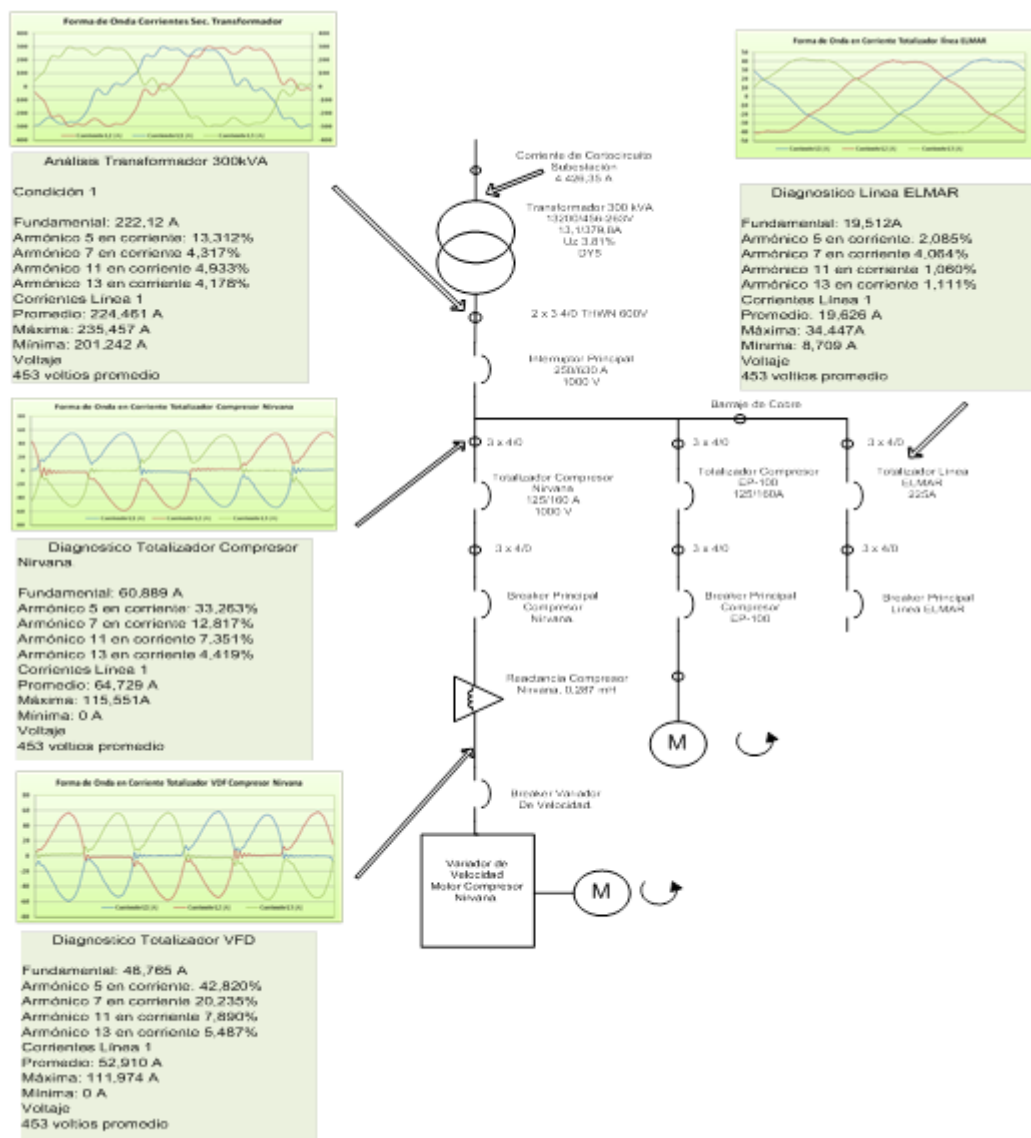


8.6. ANÁLISIS DE CONFORMIDAD DE LAS MEDICIONES ELÉCTRICAS REALIZADAS

Una vez realizadas las mediciones en los puntos a evaluar los niveles armónicos, se procede a realizar un análisis de conformidad de dichos niveles de acuerdo a estándares establecidos. En el gráfico 49 se presenta el resumen final de las mediciones obtenidas en campo.

En los capítulos 9.6.1 al 9.6.3 se expone en detalle el estudio de conformidad de las mediciones en las diferentes áreas.

Gráfica 49. Resumen gráfico de las mediciones en la subestación de Latería.



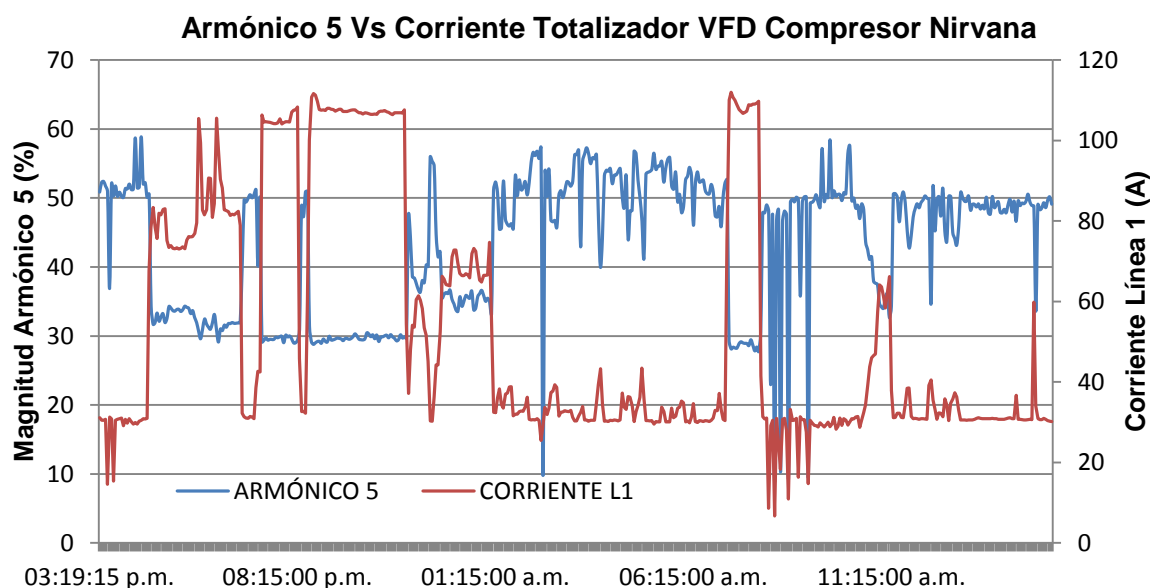
[Elaboración propia]

8.6.1. Análisis de las mediciones en el variador de velocidad del compresor Nirvana

En el gráfico 50 se aprecia el comportamiento de la corriente en la fase número 1 del variador de velocidad del compresor Nirvana y el comportamiento de la magnitud del quinto armónico en el mismo período de tiempo, se puede apreciar de la gráfica que a medida que la corriente disminuye hace que la magnitud de los

armónicos se eleven, en esta condición el variador de variador de velocidad hace que el motor del compresor trabaje a frecuencias más bajas de la nominal y disminuya la velocidad y la presión de descarga del compresor. Cuando la corriente es más elevada el variador hace que el compresor trabaje a frecuencia nominal y las magnitudes armónicas para esta condición sean menores.

Gráfica 50. Tendencia de la corriente y el quinto armónicos en el variador de velocidad del compresor Nirvana.



De las mediciones realizadas en el variador de velocidad del compresor Nirvana se presentan en la tabla 7 los promedios de las magnitudes armónicas en corriente registradas en las mediciones, para luego establecer si están cumpliendo con los límites que las normas imponen.

Tabla 7. Promedios de las magnitudes armónicas en el variador de velocidad del compresor Nirvana.

Orden Armónico	I_h Promedio (%)
Fundamental (A)	48,76
Armónico 5 (% I_n)	42,82
Armónico 7 (% I_n)	20,23
Armónico 11 (% I_n)	7,89
Armónico 13 (% I_n)	5,48

[Elaboración propia]

Para determinar si los armónicos individuales presentes en el totalizador del compresor Nirvana están por encima o por debajo de los valores recomendados, la norma IEEE 519 – 1992 establece que el límite de la magnitud del armónico es determinada de la siguiente manera:

$$I_{hl} = \frac{1}{h} * 100 \quad \text{Ecuación 8}$$

I_{hl} : Corriente armónica límite (A)

h : Orden armónico.

$$I_{hl} = \frac{1}{5} * 100 \quad \text{Ecuación 9}$$

$$I_{hl} = 20\%$$

$$I_{hl} = \frac{1}{11} * 100 \quad \text{Ecuación 11}$$

$$I_{hl} = 9,09\%$$

$$I_{hl} = \frac{1}{7} * 100 \quad \text{Ecuación 10}$$

$$I_{hl} = 14,28\%$$

$$I_{hl} = \frac{1}{13} * 100 \quad \text{Ecuación 12}$$

$$I_{hl} = 7,69\%$$

En la tabla 8 se demuestra que las magnitudes armónicas del orden 5 y 7 no cumplen con los límites permitidos y calculados con las ecuaciones (9) y (10), las magnitudes armónicas del orden 11 y 13 cumplen con los límites establecidos y calculados con las ecuaciones (11) y (12) pero están muy cercanos a incumplir.

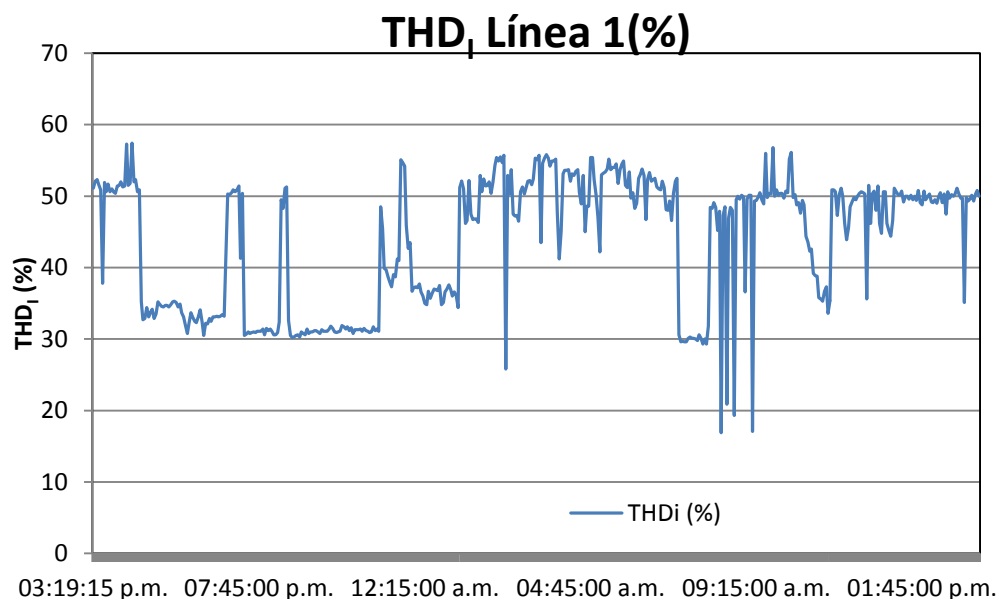
Tabla 8. Cumplimiento con la norma de las magnitudes armónicas en el variador de velocidad del compresor Nirvana.

Orden Armónico	I_h Promedio (%)	Límite de los Armónicos Individuales	Cumplimiento con la Norma
Fundamental (V/A)	48,76	-	-
Armónico 5 (% I_n)	42,82	20,00%	No
Armónico 7 (% I_n)	20,23	14,28%	No
Armónico 11 (% I_n)	7,89	9,09%	Si
Armónico 13 (% I_n)	5,48	7,69%	Si

[Elaboración propia]

A continuación en el gráfico 51 se muestra el comportamiento del THD (Total Harmonic Distorsion) en corriente registrado en el variador de velocidad del compresor Nirvana y se establece que tuvo un promedio de 43,58% durante la medición realizada.

Gráfica 51. Tendencia del THD en corriente en el variador de velocidad del compresor Nirvana.



8.6.2. Análisis de las mediciones en el transformador principal área de Latería

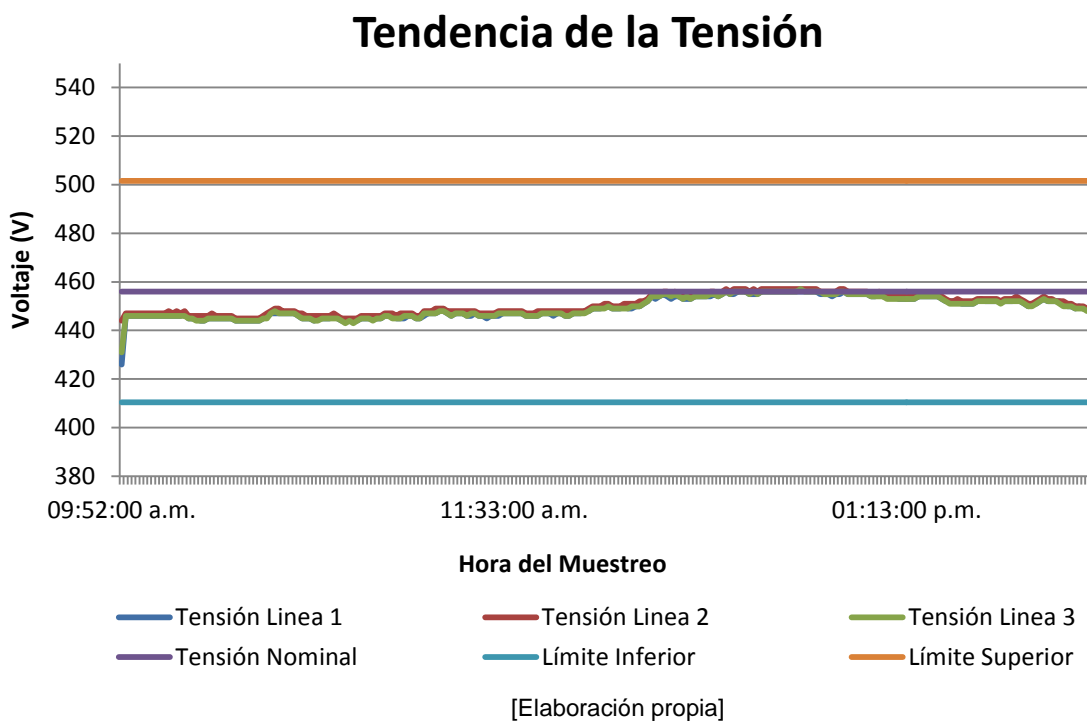
Se realizó un estudio de porcentaje de desbalance en el transformador principal con el fin de verificar los niveles de carga en las diferentes fases, generalmente este valor de desbalance varía debido a cargas monofásicas en un sistema de potencia trifásico. Se utilizaron los registros de mediciones de tensión expuestos en el **anexo 12.1.2** y con las ecuaciones (1), (2), (3), (4), (5) se obtuvieron los niveles de desbalance como se observa en la tabla 9. En los gráficos 52 y 53 se muestra el comportamiento de variación y desbalance de tensión a lo largo de las mediciones.

Tabla 9. Variación de la tensión y corriente en el transformador principal *Latería*.

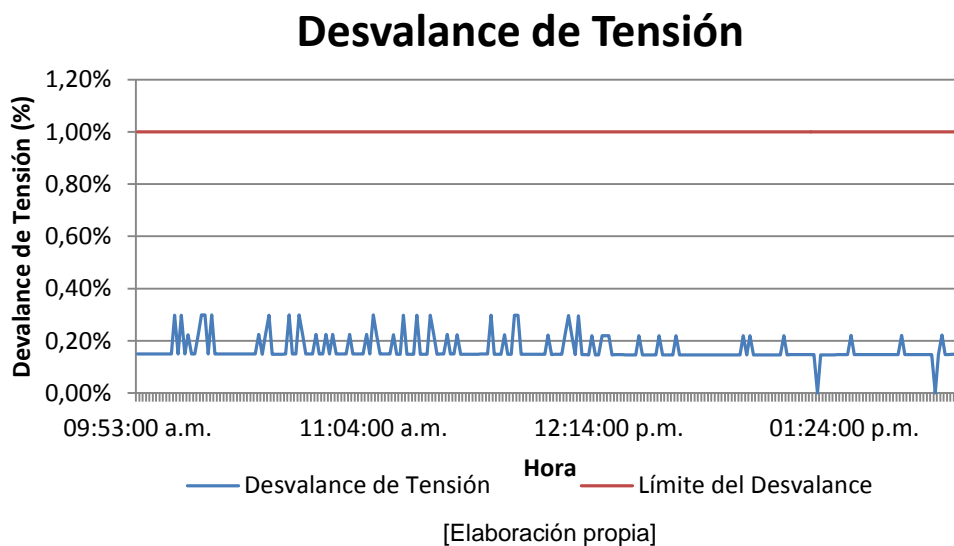
Variable	Variación de la tensión (%)	Desbalance de Tensión (%)
Promedio	-1,35	0,17
Máximo	0,15	0,30
Mínimo	-4,90	0
Cumple	SI	SI

[Elaboración propia]

Gráfica 52. Evolución de la tensión por fases en el transformador Latería.



Gráfica 53. Comportamiento del desbalance de tensión en el transformador *Latería*.

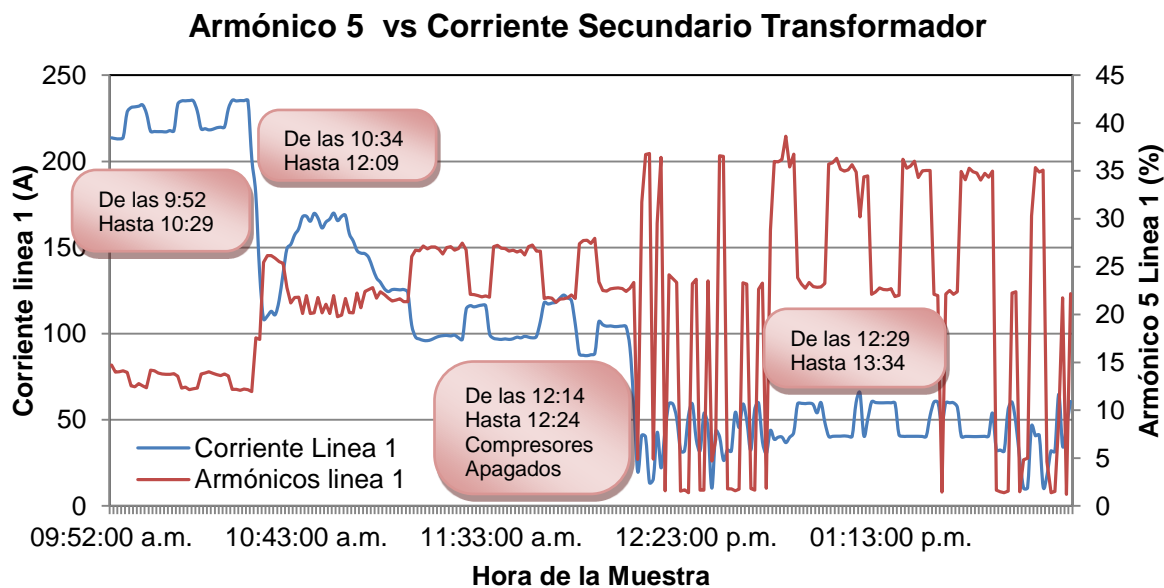


De acuerdo a los resultados obtenidos en las mediciones del transformador del área de latería se pudo determinar que:

- La tensión de salida del transformador de 300 kVA que alimenta el compresor Nirvana, el compresor EP 100 y la Línea de producción ELMAR es muy estable. La norma NTC 5000 sugiere como límites máximos y mínimos el rango de $\pm 10\%$ de la tensión de alimentación declarado. En este caso el Transformador en el lado de baja tensión opera a 456 V nominales, lo que define unos límites de hasta 501,6 V y mínimo de 410,4 V. El valor máximo alcanzado fue de 449 V y mínimo 433 V; por tanto estos valores no exceden los límites sugeridos. [8]
- De igual forma, no se presentan componentes de secuencia negativa que aporten a desmejorar la eficiencia del transformador por desbalance de tensión, tampoco de corriente. Se sugiere en tensión según NTC 5000 un 2 % en desbalance de tensión. [8]

En el gráfico 54 se puede observar la tendencia de la corriente durante el período de medición y la tendencia del quinto armónico en el mismo período de tiempo.

Gráfica 54. Tendencia de la corriente y el quinto armónico en el secundario del transformador de Latería.



[Elaboración propia]

Durante la medición presentada anteriormente se apreciaron tres situaciones diferentes expuestas en la tabla 10.

- En la primera situación se encontraba en funcionamiento los dos compresores y la línea de producción ELMAR de las 9:52 de la mañana hasta las 10:29 de la mañana.
- En la situación 2 solo estaba funcionando el compresor Nirvana con un alto factor de carga y la línea de producción ELMAR de 10:30 de la mañana hasta las 12:05 del mediodía.
- En la tercera situación se observa que el compresor Nirvana estaba trabajando con un factor de carga bajo y la línea de producción ELMAR en condiciones normales.
- Puede apreciarse en las mediciones realizadas que cuando el compresor Nirvana trabaja en régimen bajo de operación utiliza el variador de velocidad al máximo para lograr una velocidad mínima, es en esta condición que la magnitud de los armónicos se eleva.

Tabla 10. Condiciones en las mediciones del transformador principal *Latería*.

Condición 1	Los dos compresores y la línea de producción ELMAR
Condición 2	Solo el compresor Nirvana alta carga y la línea de producción ELMAR
Condición 3	Solo el compresor Nirvana baja carga y la línea de producción ELMAR

[Elaboración propia]

En la tabla 11 se presentan los promedios, máximos y mínimos de las corrientes medidas en el secundario del transformador, puede apreciarse que en la condición 1 (Los dos compresores y la línea de producción ELMAR) el transformador soporta la máxima corriente que el sistema demanda, y las magnitudes armónicas para esta condición son bajas, en la tabla 12 se muestran los armónicos más predominantes medidos en el transformador y puede observarse que en la condición 3 (Solo el compresor Nirvana a baja carga y la línea de producción ELMAR), las magnitudes armónicas se elevan. Las magnitudes armónicas se elevan en la tercera condición porque el compresor Nirvana utiliza el variador de velocidad para reducir la velocidad del motor y de esta manera reducir la cantidad de aire que le entrega al sistema.

Tabla 11. Corrientes medidas en el transformador principal *Latería*.

Corriente Línea 1 Condición 1 (A)		Corriente Línea 1 Condición 2 (A)		Corriente Línea 1 Condición 3 (A)	
Promedio	224,46	Promedio	132,25	Promedio	55,50
Máxima	235,45	Máxima	181,41	Máxima	99,68
Mínima	201,24	Mínima	104,04	Mínima	10,18

[Elaboración propia]

Tabla 12. Armónicos presentes en el transformador principal *Latería*

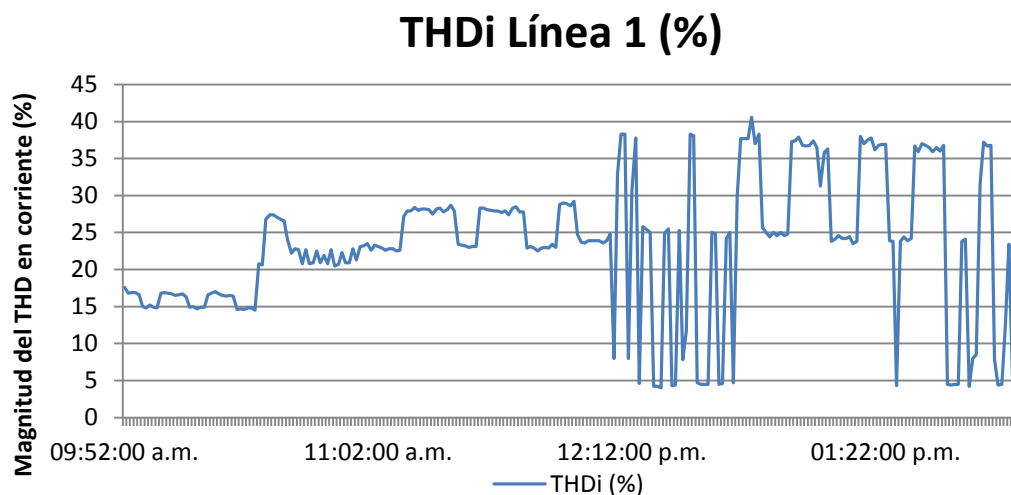
Orden Armónico	Condición 1 I_h	Condición 2 I_h	Condición 3 I_h
Fundamental (A)	222,12	128,59	54,74
Armónico 5 (% I_n)	13,31	22,13	23,32
Armónico 7 (% I_n)	4,31	4,79	9,15
Armónico 11 (% I_n)	4,93	5,48	4,44
Armónico 13 (% I_n)	4,17	2,48	3,24

[Elaboración propia]

Debido a que la medición realizada en el transformador principal del área de *Latería* no cumple con algunas de las exigencias hechas por la norma IEEE 519 – 1992, (tiempo de muestreo cada 10 minutos y 7 días de medición), no se hace el cálculo de conformidad con esta norma. Los valores medidos sirven como referencia para ver el impacto que los equipos generadores de armónicos le están haciendo al sistema.

En el gráfico 55 se muestra el comportamiento del THD en corriente de la fase número 1, presente en el secundario del transformador del área de *Latería*, en ella se aprecia que el promedio del THD_i fue de 23,27%, alcanzó un máximo de 40,6% y un mínimo de 4%, el comportamiento del THD en corriente es cambiante con respecto al tiempo debido al cambio constante de carga que tiene el compresor Nirvana, a medida que la corriente fundamental disminuye obliga a al THD en corriente a aumentar su magnitud.

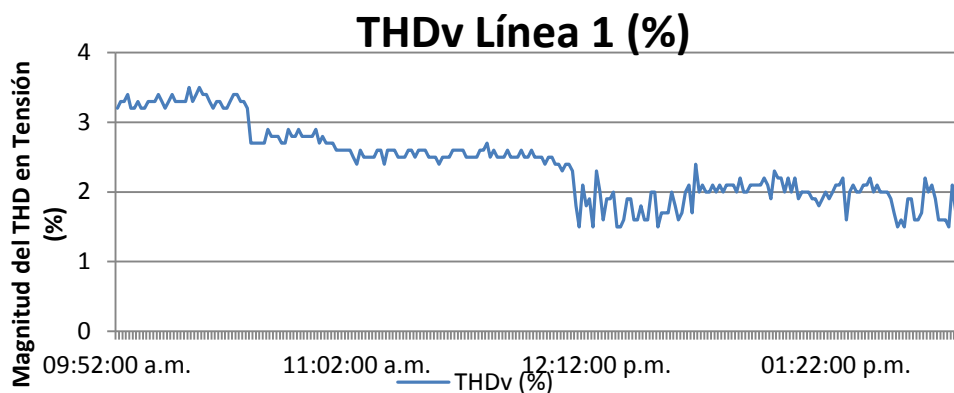
Gráfica 55. Tendencia del THD en corriente en el secundario del transformador de Latería.



[Elaboración propia]

El comportamiento del THD_V en el secundario del transformador de latería expuesto en el gráfico 56 no sobrepasa el 5% que la norma IEEE 519 – 1992 pone como límite para sistemas con tensión nominal en el PCC de menores a 69 kV. La IEEE expone que los usuarios finales serán responsables de limitar las inyecciones de corrientes armónicas, mientras que los proveedores serán principalmente responsables de limitar la distorsión de tensión en la red de distribución. Debido a que las magnitudes armónicas en corriente son más elevadas se concluye y confirma que los armónicos están siendo generados por el usuario y algún equipo asociado a la subestación. El THD_V por debajo de 5% confirma que el barraje de 13.2 kV al que está conectado el transformador principal de Latería no le está inyectando armónicos a la red de baja tensión de la misma área. [10]

Gráfica 56. Tendencia del THD en tensión en el secundario del transformador de Latería.

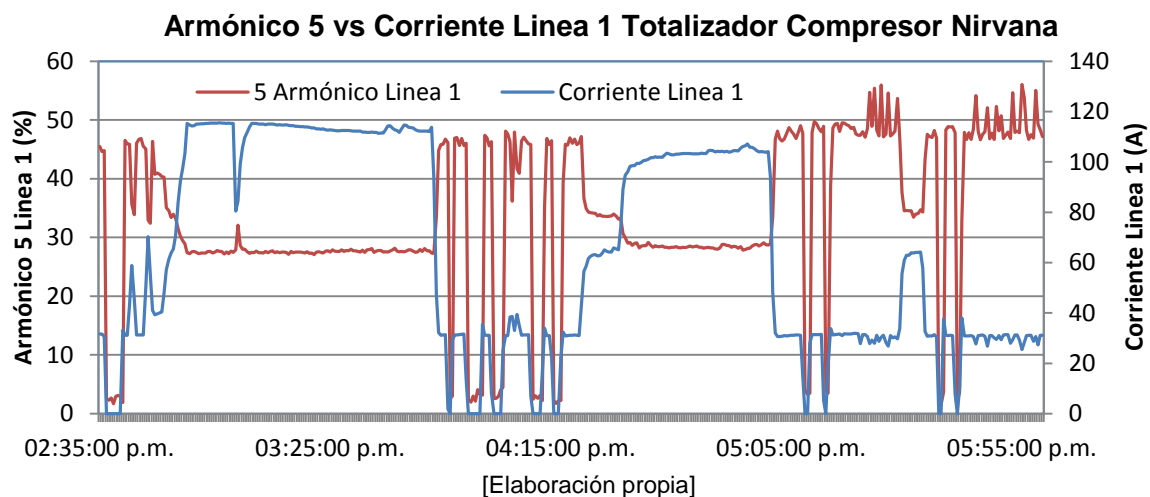


[Elaboración propia]

8.6.3. Análisis de las mediciones en el totalizador del compresor Nirvana

En las mediciones realizadas en el breaker principal que protege el compresor Nirvana también puede notarse el comportamiento que tiene la corriente y la magnitud del quinto armónico, en el gráfico 57 puede notarse nuevamente que a medida que la corriente de carga disminuye, las magnitudes armónicas aumentan y viceversa.

Gráfica 57. Tendencia de la corriente y el quinto armónicos en el totalizador del compresor Nirvana.



En la medición expuesta en el gráfico 57 que se realiza aguas arriba de la protección principal del compresor Nirvana se refleja que las magnitudes

armónicas son menores que en la medición realizada en el variador de velocidad, y es debido al filtrado que hace la reactancia de línea conectada al variador de velocidad. La reactancia de línea no está filtrando la totalidad de las magnitudes armónicas generadas por el variador de velocidad ya que solo está diseñada para filtrar el 3% de las magnitudes armónicas generadas. Las altas magnitudes armónicas generadas por el variador de velocidad están por fuera de los parámetros de diseño y la causa de esto puede ser el desgaste de la electrónica de potencia de las tarjetas electrónicas que usa el variador de velocidad.

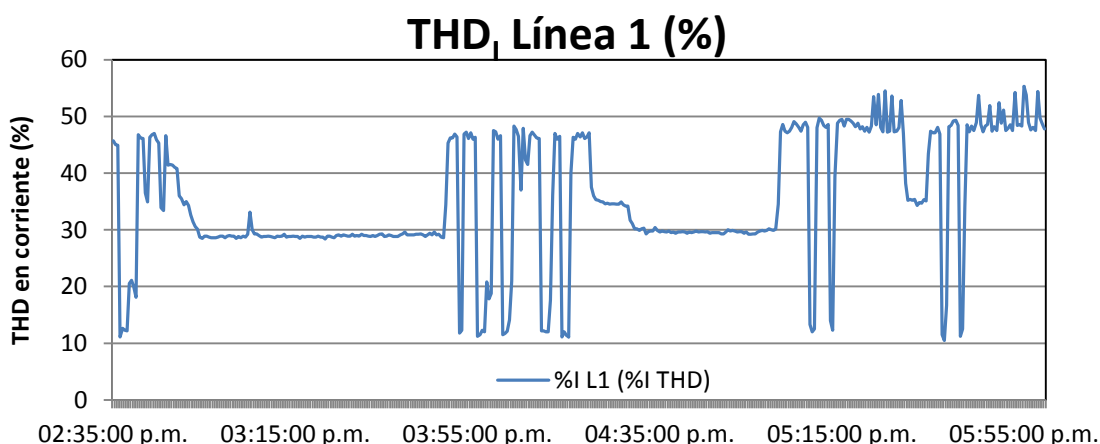
De las mediciones realizadas en el totalizador del compresor Nirvana se presentan en la tabla 13 los promedios de las magnitudes armónicas en corrientes registradas en las mediciones, y se establece si las magnitudes armónicas en este punto están cumpliendo con los límites permitidos.

Tabla 13. Promedios de las magnitudes armónicas en corriente en el totalizador del compresor Nirvana.

Orden Armónico	I_h Promedio (%)	Límite de los Armónicos Individuales	Cumplimiento con la Norma
Fundamental (A)	60,889	-	-
Armónico 5	33,263	20,0%	No
Armónico 7	12,817	14,3%	Si
Armónico 11	7,351	9,1%	Si
Armónico 13	4,419	7,7%	Si

[Elaboración propia]

Gráfica 58. Tendencia del THD_i en el totalizador del compresor Nirvana.



[Elaboración propia]

El porcentaje de THD_1 de la línea 1 registrado en el totalizador del compresor Nirvana alcanza un valor promedio de 36,94%, un máximo de 55,3% y un mínimo de 11,1%.

8.7. ESTUDIO DE MITIGACIÓN DE ARMÓNICOS MEDIANTE IMPLEMENTACIÓN DE UN FILTRO ACTIVO

8.7.1. Situación actual

Según lo presentado en los capítulos anteriores, se identificó mediante mediciones y análisis de campo un problema de armónicos en la subestación *Latería* que genera un comportamiento no deseado en el variador de velocidad del compresor Nirvana.

8.7.2. Concepto de la mejora

La solución más acorde a la necesidad de armónicos en el sistema de potencia correspondiente a la subestación *Latería* es un filtro activo (Active Power Filter) el cual es un filtro adaptativo a las frecuencias armónicas que se presentan en el sistema. Se escogió este tipo de solución debido a que es la única que permite reducir el porcentaje de armónicos en cualquier rango de trabajo del variador de velocidad del compresor.

La solución tecnológica escogida finalmente es un filtro activo AccuSine® de la marca Schneider Electric, debido a su buen desempeño y facilidad de adquisición en el mercado.

8.7.3. Situación futura

Una vez instalada la mejora tecnológica propuesta (Filtro activo corrector de armónicos) se enumeran los siguientes beneficios en el sistema de potencia del área de latería:

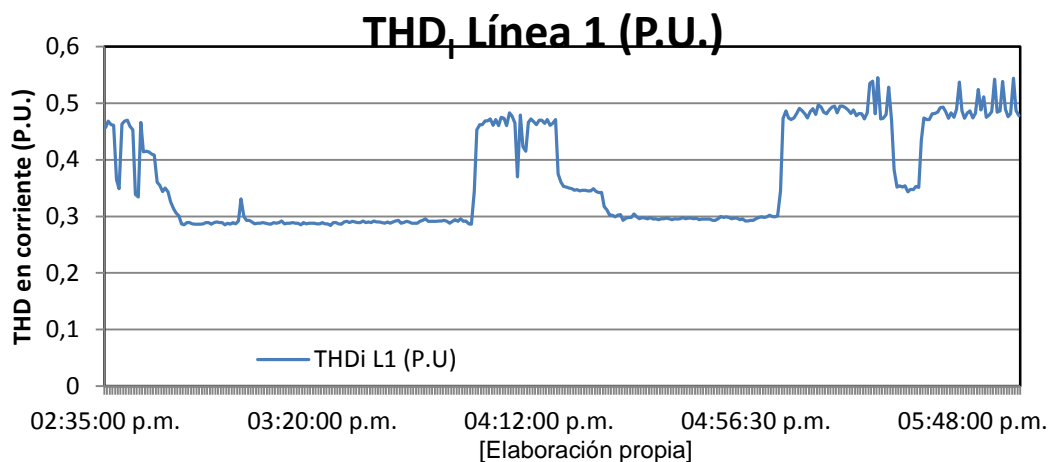
- Reducción de los niveles de armónicos
- Aumento del factor de potencia y disminución de la potencia reactiva
- Evitar el sobrecalentamiento de conductores, transformador y equipos de proceso
- Eliminar el número de paradas innecesarias debido al mantenimiento de las tarjetas electrónicas del variador de velocidad del compresor Nirvana

8.7.4. Ahorro energético

Se usarán los datos registrados de la medición realizada en el totalizador del compresor Nirvana para calcular un filtro activo AccuSine® de la empresa SCHNEIDER ELECTRIC S.A, y reducir la cantidad de armónicos generados por el compresor Nirvana, además ayudando a la reducción del consumo de energía eléctrica del equipo y a la generación de gases efectos invernadero (CO_2) [13].

A continuación en los gráficos 59 y 60; así como en la tabla 14 se presenta un resumen de las mediciones realizadas en el totalizador del compresor Nirvana y se obtienen los datos necesarios para realizar el cálculo del filtro:

Gráfica 59. Tendencia del THDI en P.U. en el totalizador del compresor Nirvana.



Gráfica 60. Tendencia de la corriente y la potencia reactiva en el totalizador del compresor Nirvana.

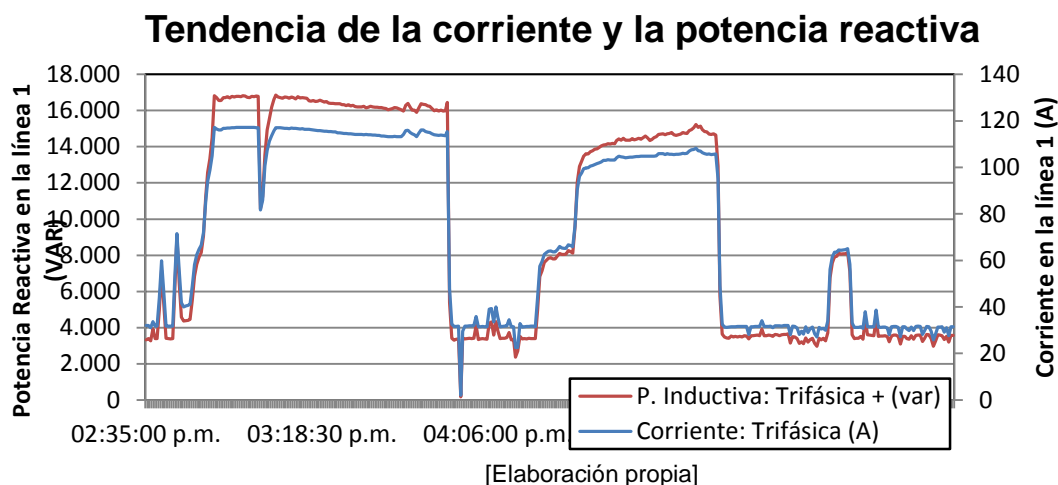


Tabla 14. Valores máximos registrados en el totalizador del compresor Nirvana.

Valores Máximos del Estudio	
Tensión Máximo (V)	462,00
Corriente Máxima (A)	117,27
THD en corriente Máxima (P.U.)	0,55
Energía Reactiva Máxima (VAR)	16.862

[Elaboración propia]

Mediante la ecuación (13) es posible estimar la corriente RMS armónica, es decir la componente efectiva relacionada con las frecuencias no fundamentales:

$$I_H = \frac{I_{RMS}}{\sqrt{\frac{1}{THD_I^2} + 1}} \quad \text{Ecuación 13}$$

Dónde:

- I_{RMS} : Corriente total de carga
- THD_I : Tasa de distorsión armónica en corriente
- I_H : Corriente efectiva armónica.

Una vez obtenidos los datos, se estima la corriente armónica total:

$$I_H = \frac{117,27 \text{ A}}{\sqrt{\frac{1}{0,55^2} + 1}} \quad \text{Ecuación 14}$$

$$I_H = 56,755 \text{ A}_{RMS} \quad \text{Ecuación 15}$$

El filtro activo compensa simultáneamente los armónicos y los reactivos mediante inyección dinámica de corriente. La capacidad total de inyección del filtro está dada por la relación de la ecuación (16):

$$I_{FILTRO} = \sqrt{I_H^2 + I_R^2} \quad \text{Ecuación 16}$$

Dónde:

- I_{FILTRO} : Capacidad requerida del filtro activo

- I_H : Corriente efectiva armónica.
- I_R : Corriente efectiva reactiva requerida

Así, se estima por medio de la ecuación (17) la corriente equivalente necesaria para compensar los 16.862 VAR que absorbe la carga, asumiendo un factor de potencia objetivo unitario. Este valor se obtiene del registro de medición de potencia reactiva presentado en el **anexo 12.1.3**.

$$I_R = \frac{Q_C}{\sqrt{3}xV_{L-L}} \quad \text{Ecuación 17}$$

$$I_R = \frac{16.862 \text{ VAR}}{\sqrt{3} x 462 \text{ V}} \quad \text{Ecuación 18}$$

$$I_R = 21,072 \text{ A} \quad \text{Ecuación 19}$$

Finalmente se calcula por medio de la ecuación (20) la capacidad del filtro requerido, utilizando los resultados de las ecuaciones (15) y (19):

$$I_{FILTRO} = \sqrt{56,755 \text{ A}^2 + 21,072 \text{ A}^2} \quad \text{Ecuación 20}$$

$$I_{FILTRO} = 60,540 \text{ A} \quad \text{Ecuación 21}$$

De manera que para evitar que el THD en corriente tenga valores elevados es necesario instalar un filtro activo AccuSine® de 100 amperios, en paralelo con el compresor Nirvana.

Uno de los beneficios más importantes es la reducción de la corriente fundamental, ya que las corrientes armónicas no se le están sumando, a continuación se calcula los beneficios energéticos utilizando los datos promedio de las variables registradas en el totalizador del compresor Nirvana expuestos en la tabla 15.

Tabla 15. Valores promedio registrados en el totalizador del compresor Nirvana.

Valores Promedios del Estudio	
Tensión Promedio (V)	450,30
Corriente Promedio (A)	72,53
THD en corriente Promedio (P.U.)	0,35
Energía Reactiva Consumida Promedio (VAR)	9.676

[Elaboración propia]

Primero se calcula la corriente armónica promedio utilizando la ecuación (13), solo que esta vez se utilizan los datos promedios de la medición realizada.

$$I_H = \frac{72,53 \text{ A}}{\sqrt{\frac{1}{0,35^2} + 1}} \quad \text{Ecuación 22}$$

$$I_H = 24,0 \text{ A}_{RMS} \quad \text{Ecuación 23}$$

Luego se calcula la potencia activa que se dejará de consumir luego de la instalación del filtro activo por medio de la ecuación (24):

$$P = \sqrt{3} * V * I_H * F.P. \quad \text{Ecuación 24}$$

Dónde:

P: Potencia Activa [kW]

V: Tensión [V] = 450,3 V

I_H : Corriente Armónica [A] = 24 A

FP: Factor de Potencia Meta [P.U.] = 0,94

$$P = \sqrt{3} * 450,3 * 24 * 0,94 \quad \text{Ecuación 25}$$

$$P = 17,04 \text{ kW} \quad \text{Ecuación 26}$$

Por último se calcula con la ecuación (27) el ahorro de energía activa dejada de consumir por la instalación del filtro activo utilizando los resultados de la ecuación (26):

$$E = P * T \quad \text{Ecuación 27}$$

Dónde:

P: Potencia Activa [kW]

T: Régimen de operación (18 horas diarias, 25 días mensuales, 12 meses al año) = 5.400 h/año.

$$E = 17,04 \text{ kW} * 5.400 \frac{\text{h}}{\text{año}} \quad \text{Ecuación 28}$$

$$E = 91.996 \frac{\text{kWh}}{\text{año}} \quad \text{Ecuación 29}$$

8.7.5. Variables ambientales

El cálculo de emisiones de dióxido de carbono equivalentes a la disminución del consumo de energía se determina con el factor de emisión, el cual equivale a 0,127 Kg. de CO₂/kWh para Colombia. [17]

La disminución de emisiones por concepto de mitigación de armónicos mediante la implementación de un filtro activo es de **11.683 Kg. de CO₂** al año.

8.7.6. Ahorro económico

La tabla 16 expone la cuantificación de los beneficios económicos anuales previstos por la implementación de un filtro activo en el totalizador del compresor del subestación *Latería*. El ahorro económico se calcula utilizando la ecuación (30). [13]

$$AE = E * Ta \quad \text{Ecuación 30}$$

Dónde:

AE: Ahorro económico [COL\$]

E: Energía activa ahorrada [kWh/año] = 91.996 kWh/año

Ta: Tarifa acordada con el operador de red al ser usuario no regulado [COL\$/kWh] = 240 COL\$/kWh.

Tabla 16. Ahorro económico debido a la implementación de un filtro activo de corrección armónica.

Ahorro energético estimado kWh/año	91.996
Tarifa energética COL\$/kWh	240
Beneficios económicos anuales (COL\$)	22.079.053
Inversión estimada (COL\$)	69.600.000
Amortización simple años	3,15

[Elaboración propia]

El valor de la inversión estimada del cuadro anterior es soportado conforme se presenta en el **anexo 12.1.4**.

8.7.7. Resumen

En la tabla 17 se exponen los beneficios económicos y ambientales que se pueden obtener por la implementación de un filtro activo en el totalizador del compresor del subestación *Latería*.

Tabla 17. Resumen de la propuesta de mejora.

EQUIPO	Ahorro Energético Anual (kWh/año)	Ahorro Económico Anual (COL\$/año)	Inversión (COL\$)	PRS (Años)	Ahorro anual en emisiones (Kg. CO ₂ /año)
Filtro activo	91.996	22.079.053	69.600.000	3,15	11.683

[Elaboración propia]

9. RECOMENDACIONES

Adicionalmente a la investigación realizada se obtuvo un consenso de recomendaciones que se le realizan a la empresa GRACETALES S.A. con el fin de mejorar la calidad del sistema de potencia en general, las cuales son:

- Realizar una serie de investigaciones posteriores a este estudio de calidad de la potencia que permitan esclarecer un estado completo y detallado de la subestación *Latería*; en materia de conformidad con el RETIE y con la NTC 2050 sección 450; así como un análisis de cumplimiento de dicha subestación en materia de sistemas a puesta a tierra de conformidad con IEEE 80.
- Considerar cotizaciones adicionales de fabricantes, los cuales ofrezcan un filtro activo de iguales características, con el objeto de comparar y decidir cuál representaría una mejor opción teniendo en cuenta condiciones como: costo de adquisición, tiempo de entrega, garantías, soporte técnico entre otros.
- En caso tal GRACETALES S.A. decida no instalar el filtro activo propuesto en esta investigación, se recomienda realizar un estudio de análisis de aceite aislante del transformador de 300 kVA que alimenta los compresores y la línea de producción ELMAR, para determinar el estado de este, y los posibles daños que puede tener el papel del transformador. Además realizar mediciones de resistencia a los devanados del primario y secundario, de esta manera se podrá calcular la máxima corriente al que el transformador puede ser sometido con un alto nivel de armónicos.

10. CONCLUSIONES

Al finalizar las actividades correspondientes a la inspección y estudio de calidad de potencia en la subestación *Latería* y una vez recopilada y procesada la información correspondiente a mediciones y análisis de conformidad se llegaron a las siguientes conclusiones:

- Las mediciones arrojadas en la subestación *Latería* indican que hay un alto porcentaje de armónicos y en promedio el THD_I tiene un valor de 23,27%, y el THD_V tiene un promedio de 2,39%; se determinó que los armónicos son generados aguas abajo del transformador, en este caso por el variador de velocidad del compresor Nirvana.
- La reactancia de línea conectada en serie con el variador de velocidad del compresor Nirvana es insuficiente para reducir los armónicos que este compresor genera.
- Con la termografía realizada al compresor Nirvana se determinó que la fase L1 conectada al variador de velocidad tiene una temperatura de 113,3 °C, y un delta (ΔT) de 47,2 °C, lo cual es una condición anormal y mereció una intervención inmediata para corregir la anomalía.
- Mediante la instalación de un filtro activo en el totalizador del compresor Nirvana se espera reducir la cantidad de armónicos que este variador le inyecta a la red, lo cual puede eventualmente desencadenar en situaciones tales como: sobrecalentamiento de conductores, pérdidas de energía y reincidencia de fallas de las tarjetas electrónicas. Además de representar un ahorro de estimado de aproximadamente COL\$ 22.079.953 al año, de conformidad con los cálculos expuestos en el apartado **9.7.6 Ahorro Económico**.

GLOSARIO

Para efectos del presente proyecto se tendrán en cuenta las definiciones generales tomadas del capítulo 2 de la norma NTC 5000, del Artículo N°1 de la Resolución CREG N° 024 – 2005, y del capítulo 3 de la norma IEEE 519 – 1992. [5,8,10]

ARMÓNICO: Componente sinusoidal de una onda o cantidad periódica que es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental. [10]

ARMÓNICO CARACTERÍSTICO: Son aquellos armónicos particulares producidos por una carga no lineal en condiciones normales de operación. Por ejemplo, los armónicos característicos de un equipo convertidor semiconductor de seis pulsos, son los armónicos impares no triples (de orden 5, 7, 11, 13, etc). [8,10]

ARMÓNICOS NO CARACTERÍSTICOS: Son aquellos armónicos producidos por cargas no lineales, pero no en condiciones normales de operación. Por ejemplo en un convertidor semiconductor, pueden ser un resultado de frecuencias de pulso; una demodulación de los armónicos característicos y las frecuencias fundamentales; o un desequilibrio en el sistema de alimentación, ángulo de retraso asimétrico o la operación de cicloconvertidor. [8,10]

CALIDAD DE LA POTENCIA ELÉCTRICA (CPE): Para efectos de esta resolución, se define como el conjunto de calificadores de fenómenos inherentes a la forma de onda de la tensión, que permiten juzgar el valor de las desviaciones de la tensión instantánea con respecto a su forma y frecuencia estándar, así como el efecto que dichas desviaciones pueden tener sobre los equipos eléctricos u otros sistemas. [5]

ELEVACIÓN (SWELL): Aumento brusco de la tensión de alimentación a un valor situado, por encima del 110 % de la tensión declarada V_c seguida del restablecimiento de la tensión después de un corto lapso de tiempo. Por convenio, esta variación de corta duración dura entre medio ciclo a 1 min. [8]

HUNDIMIENTO (SAG). Disminución brusca de la tensión de alimentación a un valor situado, entre el 90 y el 10 % de la tensión declarada V_c seguida del restablecimiento de la tensión después de un corto lapso de tiempo. Por convenio, esta variación de corta duración dura entre medio ciclo a 1 min. [8]

OPERADOR DE RED (OR): Es la persona o entidad encargada de la planeación, expansión, inversión, operación y mantenimiento de todo o parte de un Sistema de Transmisión Regional (STR) o Sistema de Distribución Local (SDL). [8]

PERÍODO DE MEDIDA: Es el período de tiempo durante el cual se realizan las mediciones de los diferentes parámetros de calidad de potencia de manera ininterrumpida. [8]

P_{ST} (PERCIBILITY SHORT TIME – SEVERIDAD DE CORTA DURACIÓN): Es un indicador de la perceptibilidad de un equipo o sistema ante fluctuaciones de tensión durante un período de tiempo corto (10 minutos), obtenido de forma estadística a partir del tratamiento de la señal de tensión. La forma de calcularlo se define en el Estándar IEC-61000-4-15 (2003-02). [5]

PUNTO DE CONEXIÓN COMÚN: Es el punto de conexión individual entre el Sistema de Distribución Local (SDL) o el Sistema de Transmisión Regional (STR) y el usuario final (el punto de medida de energía). [8]

RELACIÓN DE CORTO-CIRCUITO (I_{sc}/I_L): Es la relación de la corriente de cortocircuito en el punto de conexión común (PCC), a la corriente de demanda máxima. [8]

SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL (SDL): Sistema de transporte de energía eléctrica, compuesto por redes de distribución municipales; conformado por un conjunto de líneas y subestaciones, con sus equipos asociados, que operan a tensiones menores a 115 kV, que no pertenecen a un sistema regional por estar dedicadas al servicio de un sistema de distribución municipal, o local. [8]

SISTEMA DE TRANSMISIÓN REGIONAL (STR): Sistema interconectado de transmisión de energía eléctrica, compuesto por redes regionales o interregionales de transmisión; conformado por un conjunto de líneas y subestaciones con sus equipos asociados, que operan a tensiones menores de 220 kV y que no pertenecen a un sistema de distribución local. [8]

SISTEMA DE TRANSMISIÓN NACIONAL (STN): Es el sistema interconectado de transmisión de energía eléctrica compuesto por un conjunto de líneas con sus respectivos módulos de conexión, que operan a tensiones iguales o superiores a 220 kV. [8]

TDD (TOTAL DEMAND DISTORTION): Es el término RMS de la distorsión armónica de corriente, en términos de porcentaje de la máxima corriente demandada por la carga. [10]

THD (TOTAL DEMAND DISTORTION): Es el término RMS de la relación del contenido armónico de una variable (Tensión, Corriente), en términos de porcentaje de la componente fundamental. [10]

TENSIÓN DE ALIMENTACIÓN DECLARADA (V_c): Es la tensión acordada entre el operador de red y el usuario para ser aplicada en el punto de conexión común. Esta tensión deber estar normalizada en Colombia (NTC-1340). [8]

BIBLIOGRAFÍA

A continuación se presentan las referencias bibliográficas tenidas en cuenta para la elaboración del trabajo de grado:

- [1] Calidad del suministro de la energía eléctrica. CIDET, Codensa.
- [2] Calidad de potencia eléctrica en redes de distribución. ENELVEN
- [3] ROGER, C.D., MCGRANAGHAN M.F., WAYNE H. "Electrical Power Systems Quality" 1996, 265 Pages
- [4] José Daniel Arcila, Ingeniería Especializada IEB S.A. Una visión práctica de la potencia eléctrica.
- [5] COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS "CREG". Resolución 024 de 2005 (www.creg.gov.co)
- [6] Perturbaciones de Tensión. Norma EN 50160 – Característica de tensión suministrada por las redes generales de distribución. Iniciativa Leonardo para la Calidad de la Energía Eléctrica (LPQI).
- [7] PELÁEZ DELGADO, Dayana y VÉLEZ OSORIO, Oscar Javier. Evaluación de la calidad de la energía en la universidad tecnológica de Pereira. Pereira, 2008. 101 p. Tesis (Ingeniería Eléctrica). Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Ingeniería Eléctrica
- [8] Norma Técnica Colombiana NTC 5000. CALIDAD DE LA POTENCIA ELECTRICA -CPE-. DEFINICIONES Y TERMINOS FUNDAMENTALES.
- [9] José Daniel Arcila, Ingeniería Especializada IEB S.A. Armónicos en Sistemas Eléctricos
- [10] IEEE 519-1992. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems.

- [11] Norma UNE EN 50160. Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución.
- [12] Manual de Calidad de Potencia Eléctrica. Universidad Politécnica Salesiana.
- [13] Filtro activo de armónicos. Acussine, Schneider Electric.
- [14] Guía de diseño de instalaciones eléctricas – Detección y filtrado de armónicos.
- [15] IEEE Std 399-1997 Brown Book, IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial Systems.
- [16] Compresores de tornillo rotativo con transmisión por velocidad variable y refrigerados por contacto. Nirvana, Ingersoll Rand.
- [17] [http:// epi index](http://epi.index) - <http://epi.yale.edu/Countries/Colombia>. Universidad de Yale.

11. ANEXOS

11.1. REGISTROS DE LAS MEDICIONES REALIZADAS

11.1.1. Régimen de operación de los compresores durante las mediciones realizadas correspondientes a la fecha del 07 de julio del 2011.

HORA	PRESIÓN DEL SISTEMA (PSI)	COMPRESOR EP-100	COMPRESOR NIRVANA
9:04	74,81	ON	ON
9:09	74,81	ON	ON
9:14	74,53	ON	ON
9:19	74,17	ON	ON
9:24	80,62	ON	ON
9:29	76,68	ON	ON
9:34	73,53	ON	ON
9:39	71,08	ON	ON
9:44	66,71	ON	ON
9:49	64,57	ON	ON
9:54	64,87	ON	ON
9:59	69,34	ON	ON
10:04	72,22	ON	ON
10:09	73,67	ON	ON
10:14	74,72	ON	ON
10:19	73,91	ON	ON
10:24	74,42	ON	ON
10:29	81,46	ON	ON
10:34	83,87	OFF	ON
10:39	83,01	OFF	ON
10:44	82,77	OFF	ON
10:49	80,92	OFF	ON
10:54	83,81	OFF	ON
10:59	83,96	OFF	ON
11:04	84,41	OFF	ON
11:09	84,01	OFF	ON
11:14	84,28	OFF	ON
11:19	84,30	OFF	ON
11:24	84,26	OFF	ON
11:29	84,58	OFF	ON
11:34	84,22	OFF	ON
11:39	84,25	OFF	ON

HORA	PRESIÓN DEL SISTEMA (PSI)	COMPRESOR EP-100	COMPRESOR NIRVANA
11:44	84,50	OFF	ON
11:49	84,24	OFF	ON
11:54	84,87	OFF	ON
11:59	84,94	OFF	ON
12:04	84,94	OFF	ON
12:09	87,04	OFF	ON
12:14	86,60	OFF	OFF
12:19	87,01	OFF	OFF
12:24	85,96	OFF	OFF
12:29	88,46	OFF	ON
12:34	86,77	OFF	ON
12:39	87,57	OFF	ON
12:44	88,03	OFF	ON
12:49	86,81	OFF	ON
12:54	87,51	OFF	ON
12:59	87,67	OFF	ON
13:04	85,44	OFF	ON
13:09	86,18	OFF	ON
13:14	86,50	OFF	ON
13:19	86,93	OFF	ON
13:24	86,80	OFF	ON
13:29	86,20	OFF	ON
13:34	86,22	OFF	ON
13:39	88,81	OFF	OFF
13:44	88,01	OFF	ON
13:49	87,15	OFF	ON
13:55	86,71	OFF	OFF
14:00	87,37	OFF	ON

Tabla 13.1. Operación de los compresores de GRACETALES S.A. y presión en la tubería de descarga.
[Elaboración propia]



11.1.2. Registro de mediciones de nivel de tensión, desbalance y variación en el transformador del área de *Latería*

Fecha	Hora	U _{rms} Linea1 (V)	U _{rms} Linea 2 (V)	U _{rms} Linea 3 (V)	Tensión Trifásico	Tensión Nominal Transf. (V)	Límite inferior	Límite Superior	Variación de Tensión	Desequilibrio de Tensión
07/07/2011	09:55	446	447	446	446	456	410,4	501,6	-2,12%	0,15%
07/07/2011	10:00	446	447	446	446	456	410,4	501,6	-2,12%	0,15%
07/07/2011	10:05	446	448	446	446	456	410,4	501,6	-2,05%	0,30%
07/07/2011	10:10	445	446	445	445	456	410,4	501,6	-2,34%	0,15%
07/07/2011	10:15	445	446	445	445	456	410,4	501,6	-2,34%	0,15%
07/07/2011	10:20	445	446	445	445	456	410,4	501,6	-2,34%	0,15%
07/07/2011	10:25	444	445	444	444	456	410,4	501,6	-2,56%	0,15%
07/07/2011	10:30	446	447	445	446	456	410,4	501,6	-2,19%	0,22%
07/07/2011	10:35	447	448	447	447	456	410,4	501,6	-1,90%	0,15%
07/07/2011	10:40	445	446	445	445	456	410,4	501,6	-2,34%	0,15%
07/07/2011	10:45	445	446	445	445	456	410,4	501,6	-2,34%	0,15%
07/07/2011	10:50	444	445	443	444	456	410,4	501,6	-2,63%	0,23%
07/07/2011	10:55	445	446	445	445	456	410,4	501,6	-2,34%	0,15%
07/07/2011	11:00	446	447	446	446	456	410,4	501,6	-2,12%	0,15%
07/07/2011	11:05	445	447	446	446	456	410,4	501,6	-2,19%	0,22%
07/07/2011	11:10	446	448	447	447	456	410,4	501,6	-1,97%	0,22%
07/07/2011	11:15	448	449	448	448	456	410,4	501,6	-1,68%	0,15%
07/07/2011	11:20	447	448	447	447	456	410,4	501,6	-1,90%	0,15%
07/07/2011	11:25	446	447	446	446	456	410,4	501,6	-2,12%	0,15%
07/07/2011	11:30	447	448	447	447	456	410,4	501,6	-1,90%	0,15%
07/07/2011	11:35	447	448	447	447	456	410,4	501,6	-1,90%	0,15%
07/07/2011	11:40	447	448	447	447	456	410,4	501,6	-1,90%	0,15%
07/07/2011	11:45	447	448	447	447	456	410,4	501,6	-1,90%	0,15%
07/07/2011	11:50	447	448	447	447	456	410,4	501,6	-1,90%	0,15%
07/07/2011	11:55	449	450	449	449	456	410,4	501,6	-1,46%	0,15%
07/07/2011	11:59	449	450	449	449	456	410,4	501,6	-1,46%	0,15%
07/07/2011	12:05	450	452	450	450	456	410,4	501,6	-1,17%	0,30%
07/07/2011	12:10	454	455	454	454	456	410,4	501,6	-0,37%	0,15%
07/07/2011	12:15	454	455	454	454	456	410,4	501,6	-0,37%	0,15%
07/07/2011	12:20	454	455	454	454	456	410,4	501,6	-0,37%	0,15%
07/07/2011	12:25	454	455	454	454	456	410,4	501,6	-0,37%	0,15%
07/07/2011	12:30	456	457	456	456	456	410,4	501,6	0,07%	0,15%
07/07/2011	12:35	455	456	455	455	456	410,4	501,6	-0,15%	0,15%

Fecha	Hora	U _{rms} Linea1 (V)	U _{rms} Linea 2 (V)	U _{rms} Linea 3 (V)	Tensión Trifásico	Tensión Nominal Transf. (V)	Límite inferior	Límite Superior	Variación de Tensión	Desequilibrio de Tensión
07/07/2011	12:40	456	457	456	456	456	410,4	501,6	0,07%	0,15%
07/07/2011	12:45	456	457	456	456	456	410,4	501,6	0,07%	0,15%
07/07/2011	12:50	456	457	456	456	456	410,4	501,6	0,07%	0,15%
07/07/2011	12:55	455	456	455	455	456	410,4	501,6	-0,15%	0,15%
07/07/2011	13:00	455	456	455	455	456	410,4	501,6	-0,15%	0,15%
07/07/2011	13:05	454	455	454	454	456	410,4	501,6	-0,37%	0,15%
07/07/2011	13:10	454	454	453	453	456	410,4	501,6	-0,51%	0,15%
07/07/2011	13:15	453	454	453	453	456	410,4	501,6	-0,58%	0,15%
07/07/2011	13:20	454	455	454	454	456	410,4	501,6	-0,37%	0,15%
07/07/2011	13:25	452	452	451	451	456	410,4	501,6	-0,95%	0,15%
07/07/2011	13:30	451	452	451	451	456	410,4	501,6	-1,02%	0,15%
07/07/2011	13:35	452	453	452	452	456	410,4	501,6	-0,80%	0,15%
07/07/2011	13:40	452	453	452	452	456	410,4	501,6	-0,80%	0,15%
07/07/2011	13:45	451	451	450	450	456	410,4	501,6	-1,17%	0,15%
07/07/2011	13:50	452	453	452	452	456	410,4	501,6	-0,80%	0,15%
07/07/2011	13:55	450	451	450	450	456	410,4	501,6	-1,24%	0,15%

11.1.3. Registro de mediciones en el totalizador del compresor Nirvana

Fecha de la muestra	Tensión: Trifásica (f-f) (V)	Corriente: Trifásica (A)	P. Inductiva: Trifásica (VAR)	%I L1 (%I THD)
07/07/2011 14:40	446	33,653	3.914	18,1
07/07/2011 14:44	447	31,788	3.378	47
07/07/2011 14:48	446	40,727	4.394	41,4
07/07/2011 14:52	446	85,309	11.227	32,6
07/07/2011 14:56	444	116,734	16.713	28,7
07/07/2011 15:00	443	117,2	16.768	28,9
07/07/2011 15:04	444	117,123	16.786	28,7
07/07/2011 15:08	444	117,123	16.862	28,8
07/07/2011 15:12	444	116,812	16.713	28,9
07/07/2011 15:16	444	116,268	16.529	28,5
07/07/2011 15:20	444	115,465	16.418	28,9
07/07/2011 15:26	446	114,221	16.214	29
07/07/2011 15:30	446	113,884	16.196	29
07/07/2011 15:34	446	113,237	16.085	29,3
07/07/2011 15:35	445	113,392	16.159	28,9
07/07/2011 15:38	443	115,931	16.399	29,1
07/07/2011 15:42	444	115,439	16.325	29,2
07/07/2011 15:46	445	113,833	15.975	29,1
07/07/2011 15:50	447	31,762	3.379	46,9
07/07/2011 15:54	447	32,047	3.416	46
07/07/2011 15:58	447	35,856	4.117	18,8
07/07/2011 16:04	448	39,068	4.247	46,5
07/07/2011 16:08	448	31,84	3.435	46,2
07/07/2011 16:16	449	31,348	3.379	46,3
07/07/2011 16:20	448	57,437	6.832	37,5
07/07/2011 16:24	448	64,665	7.959	34,5
07/07/2011 16:28	449	74,822	9.546	34,2
07/07/2011 16:32	449	100,88	13.776	29,3
07/07/2011 16:36	447	103,211	14.145	29,7
07/07/2011 16:40	447	104,273	14.367	29,7
07/07/2011 16:44	448	104,869	14.589	29,7
07/07/2011 16:48	449	105,905	14.718	29,5
07/07/2011 16:52	448	105,801	14.700	29,6
07/07/2011 16:56	449	107,175	15.068	29,3
07/07/2011 17:00	453	105,724	14.645	29,9
07/07/2011 17:04	457	31,425	3.471	48,1
07/07/2011 17:09	458	28,135	3.378	12,5
07/07/2011 17:14	459	31,555	3.545	48,8
07/07/2011 17:16	458	31,037	3.508	49,5
07/07/2011 17:20	457	28,083	3.139	47,4
07/07/2011 17:24	460	28,99	3.194	47,3
07/07/2011 17:28	461	29,975	3.267	52,8
07/07/2011 17:32	460	64,562	8.087	34,8
07/07/2011 17:36	461	31,503	3.507	48,1
07/07/2011 17:40	460	31,4	3.544	49,3

Fecha de la muestra	Tensión: Trifásica (f-f) (V)	Corriente: Trifásica (A)	P. Inductiva: Trifásica (VAR)	%I L1 (%I THD)
07/07/2011 17:48	461	31,452	3.508	47,4
07/07/2011 17:52	461	31,633	3.582	48,5
07/07/2011 17:56	461	31,374	3.600	48,9
07/07/2011 17:59	461	31,503	3.563	48,7

12.1.4 Soporte Técnico de Cotización de Filtro de Armónicos.

COTIZACION

Razón Social	No Aplica
NIT	No Aplica
Contacto	Sr. Manuel Marrugo
Teléfono	301 374 08 70
Ciudad	Barranquilla
FECHA	24 de septiembre de 2012



Atendiendo su amable solicitud de cotización, presentamos la siguiente oferta:

ITEM	CANT.	DESCRIPCION	UNIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL	ENTREGAS
1	1	filtro activo AccuSine Schneider electric 100 amperios	UND		60.000.000	
OBSERVACIONES:				SUBTOTAL	60.000.000	
				I.V.A. 16%	9.600.000	
				TOTAL OFERTA	69.600.000	
CONDICIONES COMERCIALES						
Forma de Pago	30 DIAS					
Moneda						
Tiempo de entrega (en días calendario)						
Garantía (en años)						
Impuesto	16%					
Validez de la Oferta	20 DIAS					

Atentamente,

JOSE NOGUERA G

Asistente Dirección Comercial
ASESOR COMERCIAL

BARRANQUILLA
Carrera 46 No. 39-42
PBX: 5-3709044
FAX: 5-3419343
Linea Gratis: 01 800 09 19311
Correo: ventasbq@eimpsa.com.co

11.2. HOJAS DE ESPECIFICACIONES (DATASHEETS)

11.2.1. Analizador de Red Circutor AR5-L



Analizadores de redes portátiles

AR5-L

Analizador portátil de redes eléctricas trifásicas y monofásicas



Descripción

- Mide todos los principales parámetros eléctricos de una red eléctrica
- Mide en verdadero valor eficaz
- Contador de energía incorporado
- Con 4 canales de tensión y 4 de corriente
- Autotrigger configurable según las magnitudes que se deseen
- Idiomas: español e inglés
- Display retroiluminado LCD, de gran tamaño
- CAT III 600 V (EN 61010). Certificado UL
- Visualización de hasta 30 parámetros eléctricos en pantalla
- Pequeño tamaño y reducido peso, solo 800 g.
- Ficheros independientes para cada medida
- Incluye potente software de análisis: **POWER VISIÓN PLUS**
- Configurable mediante menú
- Posibilidad de trabajar sin alimentación externa con una autonomía de hasta 8 horas
- Comunicación RS-232 con PC
- Autodetección de pinzas
- Autoselección de parámetros a guardar
- Cálculo del tiempo restante hasta llenado de memoria
- Memoria lineal o memoria rotativa (según configuración)

Características

	AR5-L
Circuito de alimentación	
A través de alimentador externo	100...240 V c.a. / 12 V c.c.
Frecuencia	50...60 Hz
Consumo	15 V-A
Temperatura de uso	0...+40 °C
Altitud	≤ 2000 m
Humedad de funcionamiento	80 % para temperaturas inferiores a 31 °C, disminuyendo linealmente hasta 50 % a 40 °C
Circuito de medida	
Grado de contaminación	2
Circuito de tensión	
Rango de medida	Según pinza de 0,01 A...20 kA
Relaciones de transformación de tensión y corriente	Programable
Unidades de medida	Cambio de escala automático
Memoria interna	1 Mb
Clase de precisión (*)	
Tensión	0,5 % ±2 dígitos
Corriente	0,5 % ±2 dígitos
Potencia activa	1 % ±2 dígitos
Potencia reactiva	1 % ±2 dígitos
Características constructivas	
Carcasa	Aislamiento reforzado
Teclado / display	En panel frontal
Display	LCD 160 x 160 píxeles (retroiluminado)
Conector pinzas corriente	3 / 4
Dimensiones	220 x 60 x 130 mm
Peso	800 g
Salida RS-232	Salida serie

M8-14



11.2.2. Cámara Termográfica Fluke Ti10

FLUKE

Especificaciones detalladas

	Ti25	Ti10
Temperatura		
Rango de medición de temperatura (no calibrado por debajo de -10 °C)	-20 °C a +350 °C (-4 °F a +662 °F) (dos rangos)	-20 °C a +250 °C (-4 °F a +482 °F)
Exactitud	± 2 °C o 2 % (lo que sea mayor)	± 5 °C o 5 % (lo que sea mayor)
Corrección de la emisividad en la pantalla	Sí	—
Rendimiento de creación de imágenes		
Campo visual	23° x 17°	
Resolución espacial (IFOV)	2,5 mrad	
Distancia focal mínima	Lente térmico: 15 cm (6 pulg.) Lente de luz visible (visual): 46 cm (18 pulg.)	
Enfoque	Manual	
Frecuencia de imágenes	Velocidad de actualización de 9 Hz	
Tipo de detector	Arreglo de plano focal de 160 x 120, microbolómetro sin enfriamiento	
Tipo de lente infrarrojo	lente de 20 mm F = 0,8	
Sensibilidad térmica (NETD)	≤ 0,1 °C a 30 °C (100 mK)	≤ 0,2 °C a 30 °C (150 mK)
Banda espectral infrarrojo	7,5 μm a 14 μm	
Cámara visual	Resolución de 640 x 480	
Presentación de la imagen		
Paletas	Acero, azul-rojo, alto contraste, ámbar, metal caliente, gris	Acero, azul-rojo, alto contraste, gris
Nivel y alcance	Modificación suave de la escala (automática y manual) de nivel y alcance	
Minimum span (en el modo manual)	2,5 °C (4,5 °F)	5 °C (9 °F)
Minimum span (en el modo automático)	5 °C (9 °F)	10 °C (18 °F)
Información de IR-Fusion®	Infrarrojo completo con mezcla automática MÁX, MED o MÍN; e imagen dentro de imagen con mezcla automática MÁX, MED o MÍN (mezcla visual e IR)	Infrarrojo completo o imagen dentro de imagen
Imagen dentro de imagen (PIP)	Tres niveles de mezcla IR en pantalla mostrados en el centro a 320 x 240 píxeles	100 % IR mostrado en el centro 320 x 240 píxeles
Pantalla completa (PIP desactivado)	Tres niveles de mezcla IR en pantalla mostrados en la pantalla LCD central de 640 x 480	100 % IR mostrado en el centro LCD de 640 x 480
Anotación de voz		
Anotación de voz	60 segundos máximos de tiempo de grabación por imagen	—
Almacenamiento de imágenes y datos		
Soporte de almacenamiento	Tarjeta de memoria SD (la tarjeta de memoria de 2 GB almacenará al menos 1200 imágenes IR completamente radiométricas (.is2) e imágenes visuales enlazadas, cada una con anotaciones de voz de 60 segundos, o 3000 imágenes IR básicas (.bmp))	
Formatos de archivo	No radiométrico (.bmp) o completamente radiométrico (.is2) No se requiere el software de análisis para archivos no radiométricos (.bmp)	
Formatos de archivo de exportación con software SmartView™	JPEG, BMP, GIF, PNG, TIFF, WMF, EXIF y EMF	

11.3. CARTA DE AUTORIZACIÓN PARA LA REALIZACIÓN DEL TRABAJO DE GRADO



Barranquilla, 12 de junio de 2012

Ingeniero:
JOSE AVENDAÑO
Jefe de Mantenimiento Eléctrico
Gracetales S.A
Barranquilla

REF: Visita Empresarial

Estimado JOSE AVENDAÑO, reciba mi atento saludo.

En el desarrollo curricular del programa de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de la Costa – CUC, los estudiantes tienen la asignatura PROYECTO DE GRADO, en la cual el estudiante con el acompañamiento de un tutor, desarrolla su PROYECTO DE GRADO.

En este caso su empresa GRACETALES S.A, hay dos (2) estudiante interesado en desarrollar su proyecto de grado titulado "Evaluación de los niveles de calidad de potencia en la subestación latería de GRACETALES S.A y estudio de mitigación de armónicos"

MANUEL ALEJANDRO MARRUGO GUERRERO	CC. 1.129.578.260
GREGORY MIGUEL HERNANDEZ LOPEZ	CC 1.045.666.320

De acuerdo con esto, los estudiantes presentaran a la empresa un cronograma de actividades, el cual esta contenido en su propuesta de PROYECTO DE GRADO y deberá ser aprobado por la empresa, para su posterior ejecución. Los estudiantes se sujetan a las disposiciones, políticas y normativas internas de la empresa, para dar cumplimiento al cronograma de actividades. Cumpliendo oportunamente con las actividades descritas en el cronograma y de acuerdo con la naturaleza del proyecto contamos para ello con la colaboración de personal asignado por la empresa, para la inspección y certificación del cumplimiento de las normas y políticas de la empresa en la ejecución de las actividades.

Estimado JOSE AVENDAÑO, desde ya agradezco a usted la colaboración que me pueda prestar a estos jóvenes y una vez que usted permita la realización de estas importantes actividades estaremos definiendo aquellos compromisos puntuales que conllevaria a feliz termino esta magnifica oportunidad de establecer un vinculo INTERINSTITUCIONAL.

Cualquier confirmación o aclaración al respecto por favor me puede contactar al 336-2256 / 336-2258 o por correo a: jsilva6@cuc.edu.co

Cordialmente


Ing. JORGE IVAN SILVA ORTEGA
Docente Tiempo Completo Ingeniería Eléctrica
Tel. 3362246

*VoBo
XIII/VI/XXXXII
se autoriza la medicio
no tomar la seccion*

Calle 58 N° 55-66 * Teléfonos: 3362200 - 3440024 - 3441974 * Fax: 3362222 * A.A. 50366 - Barranquilla - Colombia.